

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mateja Šalamon

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli, dipl. ing.

Student:

Mateja Šalamon

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof.dr.sc. Nastiji Degiuli na savjetima, pomoći i ukazanom povjerenju tijekom izrade ovog rada.

Također zahvaljujem doc.dr.sc. Ivanu Čatipoviću i Ivani Martić na odvojenom vremenu i pomoći pri izradi ovog rada.

Na kraju želim zahvaliti svojim roditeljima koji su mi omogućili sve što sam do sada postigla.

Mateja Šalamon



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mateja Šalamon**

Mat. br.:0035176925

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROCJENA POMORSTVENIH KARAKTERISTIKA KONTEJNERSKOG BRODA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **EVALUATION OF SEAKEEPING CHARACTERISTICS OF CONTAINER SHIP**

Opis zadatka:

U stvarnim uvjetima plovidbe brod je izložen raznim opterećenjima. Jedno od značajnijih vanjskih opterećenja koje se uzima u obzir prilikom projektiranja broskog trupa je utjecaj dinamičkog opterećenja uslijed valova. To je posebno izraženo kod brodova sa širim pramčanim dijelom kao što je to slučaj kod kontejnerskih brodova.

Određivanje odziva broda na valovima je kompleksan hidrodinamički problem. Obzirom da su eksperimentalna ispitivanja vrlo skupa i komplicirana za procjenu pomorstvenih značajki broda koriste se razni programski paketi.

Cilj ovog rada je usporedba pomorstvenih karakteristika dobivenih pomoću dva različita programska paketa koja se temelje na proračunu potencijalnog odnosno viskozno strujanja.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Proučiti teoriju njihanja broda na valovima.
2. U programskom paketu WISDAM-X analizirati poniranje i posrtanje modela broda KCS u vremenskoj domeni.
3. U programskom paketu HydroSTAR analizirati poniranje i posrtanje modela broda KCS u vremenskoj domeni.
4. Usporediti rezultate poniranja i posrtanja dobivene pomoću dva prethodno navedena programska paketa u vremenskoj domeni.
5. Numerički dobivene rezultate usporediti s dostupnim eksperimentalnim podacima iz literature.
6. Prikazati prijenosne funkcije poniranja i posrtanja broda u naravi dobivene pomoću programskog paketa HydroSTAR u frekvencijskoj domeni.

U radu koristiti programske pakete HydroSTAR (Bureau Veritas) te WISDAM-X.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datumi obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

Nastja Degiuli
Prof. dr. sc. Nastja Degiuli

Predsjednica Povjerenstva:

Nastja Degiuli
Prof. dr. sc. Nastja Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
1.1. Stabilitet broda.....	3
1.2. Sustavi dodatnog stabiliteta.....	5
1.2.1. Pasivni stabilizatori	5
1.2.2. Aktivni stabilizatori.....	7
1.2.3. Stabilizacija posrtanja	8
2. TEORIJA NJIHANJA BRODA NA VALOVIMA	9
2.1. Morski valovi.....	10
2.2. Kursni kut i susretna frekvencija	12
2.3. Model njihanja.....	15
2.3.1. Oblici njihanja	16
2.3.2. Prijenosna funkcija.....	18
3. ODREĐIVANJE ODZIVA BRODA.....	19
3.1. Uvod.....	19
3.2. Potencijalna teorija	20
3.2.1. Linearna teorija valova.....	23
3.2.2. Princip rada programskog paketa HydroSTAR.....	24
3.3. Viskozna teorija.....	27
3.3.1. Navier-Stokesove jednadžbe	30
3.3.2. Bezdimenzijski parametri viskoznog strujanja.....	32
3.3.3. Princip rada programskog paketa WISDAM-X	33
4. ANALIZA REZULTATA PONIRANJA I POSRTANJA U VREMENSKOJ DOMENI	38
4.1. Definiranje ulaznih podataka.....	38
4.2. Analiza rezultata dobivenih programskim paketom WISDAM-X.....	42
4.2.1. Amplitude poniranja	42
4.2.2. Amplitude posrtanja	46
4.3. Analiza rezultata dobivenih programskim paketom HydroSTAR.....	49
4.3.1. Amplitude poniranja	50
4.3.2. Amplitude posrtanja.....	53
5. USPOREDBA REZULTATA ODZIVA BRODA U VREMENSKOJ DOMENI	57
5.1. Usporedba rezultata odziva izračunatih programskim paketima.....	57
5.1.1. Usporedba rezultata poniranja	57
5.1.2. Usporedba rezultata posrtanja	60
5.2. Usporedba rezultata odziva određenih numerički i eksperimentalno	63

5.2.1. Usporedba rezultata poniranja	64
5.2.2. Usporedba rezultata posrtanja	68
6. REZULTATI ODZIVA U FREKVENCIJSKOJ DOMENI	72
6.1. Uvod.....	72
6.2. Odziv modela.....	73
6.2.1. Model 1	74
6.2.2. Model 2	76
6.2.3. Usporedba odziva modela	78
6.3. Odziv broda u naravi.....	79
7. ZAKLJUČAK.....	82
LITERATURA.....	84

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz teoretski stabilnog (lijevo) i teoretski nestabilnog broda (desno) [5].....	3
Slika 2.	Prikaz odnosa metacentra, težišta uzgona i težišta masa stabilnog broda [6]	4
Slika 3.	Primjer ljuljnih kobilica [7]	6
Slika 4.	Prikaz giroskopskog stabilizatora [8]	8
Slika 5.	Razine ugone za ljude na brodu [9].....	9
Slika 6.	Primjer superpozicije pravilnih valova [4]	11
Slika 7.	Susretni kutovi broda i valova [10]	13
Slika 8.	Utjecaj kursnog kuta na susretnu frekvenciju [4]	14
Slika 9.	Šest stupnjeva slobode njihanja [11]	17
Slika 10.	Prikaz napredovanja harmonijskog progresivnog vala [4]	23
Slika 11.	Prikaz generirane mreže panela u programu <i>HydroSTAR</i> [15].....	26
Slika 12.	Prikaz koordinatnih sustava korištenih u programu <i>WISDAM-X</i> [22]	34
Slika 13.	Prikaz domene simulacije u programu <i>WISDAM-X</i>	35
Slika 14.	Prikaz nacrtu rebara kontejnerskog broda KCS	39
Slika 15.	Amplitude poniranja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>WISDAM-X</i>	44
Slika 16.	Amplitude poniranja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>WISDAM-X</i>	45
Slika 17.	Amplitude poniranja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>WISDAM-X</i>	45
Slika 18.	Amplitude poniranja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>WISDAM-X</i>	46
Slika 19.	Amplitude posrtanja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>WISDAM-X</i>	47
Slika 20.	Amplitude posrtanja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>WISDAM-X</i>	48
Slika 21.	Amplitude posrtanja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>WISDAM-X</i>	48
Slika 22.	Amplitude posrtanja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>WISDAM-X</i>	49
Slika 23.	Amplitude poniranja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>HydroSTAR</i>	51
Slika 24.	Amplitude poniranja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>HydroSTAR</i>	52
Slika 25.	Amplitude poniranja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>HydroSTAR</i>	52
Slika 26.	Amplitude poniranja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>HydroSTAR</i>	53
Slika 27.	Amplitude posrtanja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>HydroSTAR</i>	54
Slika 28.	Amplitude posrtanja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>HydroSTAR</i>	55
Slika 29.	Amplitude posrtanja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>HydroSTAR</i>	56

Slika 30.	Amplitude posrtanja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>HydroSTAR</i>	56
Slika 31.	Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i>	58
Slika 32.	Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i>	59
Slika 33.	Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i>	59
Slika 34.	Usporedba amplituda poniranja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i>	60
Slika 35.	Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i>	61
Slika 36.	Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i>	61
Slika 37.	Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i>	62
Slika 38.	Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i>	62
Slika 39.	Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i> s eksperimentalnim podacima	66
Slika 40.	Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i> s eksperimentalnim podacima	66
Slika 41.	Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i> s eksperimentalnim podacima	67
Slika 42.	Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i> s eksperimentalnim podacima	70
Slika 43.	Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i> s eksperimentalnim podacima	70
Slika 44.	Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima <i>HydroSTAR</i> i <i>WISDAM-X</i> s eksperimentalnim podacima	71
Slika 45.	Usporedba odziva poniranja modela 1 pri $Fn=0$ i $Fn=0,26$	75
Slika 46.	Usporedba odziva posrtanja modela 1 pri $Fn=0$ i $Fn=0,26$	75
Slika 47.	Usporedba odziva poniranja modela 2 pri $Fn=0$ i $Fn=0,26$	77
Slika 48.	Usporedba odziva posrtanja modela 2 pri $Fn=0$ i $Fn=0,26$	77
Slika 49.	Usporedba odziva poniranja modela 1 i modela 2 pri $Fn=0,26$	78
Slika 50.	Usporedba odziva posrtanja modela 1 i modela 2 pri $Fn=0,26$	78
Slika 51.	Usporedba odziva poniranja broda u naravi pri $Fn=0$ i $Fn=0,26$	81
Slika 52.	Usporedba odziva posrtanja broda u naravi pri $Fn=0$ i $Fn=0,26$	81

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podaci o geometriji broda u naravi i modela	38
Tablica 2. Ulazni podaci za programski paket <i>WISDAM-X</i>	39
Tablica 3. Ulazni podaci modela za programski paket <i>HydroSTAR</i>	40
Tablica 4. Podaci za provedene simulacije	41
Tablica 5. Vrijednosti amplituda poniranja u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>WISDAM-X</i>	43
Tablica 6. Vrijednosti amplituda posrtanja u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>WISDAM-X</i>	46
Tablica 7. Vrijednosti susretnih frekvencija te prijenosnih funkcija poniranja i posrtanja za model 1 određene programskim paketom <i>HydroSTAR</i>	50
Tablica 8. Vrijednosti amplituda poniranja u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>HydroSTAR</i>	50
Tablica 9. Vrijednosti amplituda posrtanja u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom <i>HydroSTAR</i>	53
Tablica 10. Osrednjene vrijednosti amplituda poniranja izračunate pomoću dva programska paketa te relativno odstupanje rezultata	60
Tablica 11. Osrednjene vrijednosti amplituda posrtanja izračunate pomoću dva programska paketa te relativno odstupanje rezultata	63
Tablica 12. Dostupni eksperimentalni podaci za vrijednosti amplituda poniranja u vremenskoj domeni za pojedine slučajeve	65
Tablica 13. Osrednjene vrijednosti amplituda poniranja izračunate pomoću dva programska paketa i njihovo odstupanje od eksperimentalnih podataka	67
Tablica 14. Dostupni eksperimentalni podaci za vrijednosti amplituda posrtanja u vremenskoj domeni za pojedine slučajeve	69
Tablica 15. Osrednjene vrijednosti amplituda posrtanja izračunate pomoću dva programska paketa i njihovo odstupanje od eksperimentalnih podataka	71
Tablica 16. Vrijednosti amplituda odziva u frekvencijskoj domeni za model 1	74
Tablica 17. Vrijednosti amplituda odziva u frekvencijskoj domeni za model 2.....	76
Tablica 18. Vrijednosti amplituda odziva u frekvencijskoj domeni za brod u naravi za $Fn=0$ i $Fn=0,26$	80

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	N	ubrzanje
c	m/s	brzina napredovanja vala
d	m	dubina
f	N/m ³	sila po jedinici volumena
f_v	N/m ³	viskozna sila po jedinici volumena
f_p	N/m ³	sila tlaka po jedinici volumena
f_m	N/m ³	masena sila po jedinici volumena
g	m/s ²	ubrzanje Zemljine sile teže
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$	-	jedinični vektori u smjeru koordinatnih osi
k	1/m	valni broj
m	kg	masa broda
p	N/m ²	hidrodinamički tlak
p_G	N/m ²	tlak na granici dvaju fluida
p_p	N/m ²	piezometrički tlak
p_s	N/m ²	statički tlak
r	m	vektor položaja u brodskom koordinatnom sustavu
r_C	m	vektor težišta masa
t	s	vrijeme
u	m/s	brzina broda
u_e	m/s	relativna brzina broda
v	m/s	brzina strujanja fluida
v_0	m/s	karakteristična brzina tijela
v_p	m/s	brzina ploče
v_T	m/s	vektor translacije brzine strujanja
v_x, v_y, v_z	m/s	komponente vektora brzine strujanja u smjeru koordinatnih osi
B_{MAX}	m	širina broda
D	m	visina broda
E_T	J	ukupna energija sustava
F	N	hidrodinamička sila
$F(t)$	N	hidrodinamička uzbuda
H_{η_a}	m/m, °/m	prijenosna funkcija
I_0	m ⁴	moment inercije broda
L_0	m	karakteristična duljina tijela
L_{pp}	m	duljina broda između okomica

L_{WL}	m	duljina broda na vodnoj liniji
M	Nm	hidrodinamički moment
Q	J	izmijenjena toplina
$S_{R\zeta}(\omega)$	m ² s	spektar odziva
$S_{\zeta}(\omega)$	m ² s	spektar valova
T	m	gaz broda
T_e	s	susretni period
T_{val}	s	valni period
V_K	m ³	kontrolni volumen
W	J	izmijenjeni rad
β	°	kut nailaska valova
δ_j	m	kompleksna amplituda njihanja
ε_j	rad	fazni pomak
ζ	m	valna amplituda
ζ_a	m	jedinična valna amplituda
η_{aj}	m	realna vrijednost amplitude njihanja
η_j	m, °	amplituda njihanja
λ	m	valna duljina
μ	kg/ms	dinamički koeficijent viskoznosti
ν	m ² /s	kinematički koeficijent viskoznosti
ρ	kg/m ³	gustoća
ρ_m	kg/m ³	funkcija gustoće
σ_{ij}	N/m ²	tenzor naprezanja
τ	N/m ²	tangencijalno naprezanje
ω	rad/s	valna frekvencija
ω_e	rad/s	susretna frekvencija
ω_K	rad/s	kutna brzina strujanja oko brodskog koordinatnog sustava
Φ	m ² s	potencijal brzine strujanja
Φ_0	m ² s	funkcija potencijala brzine strujanja nailaznog vala
Φ_7	m ² s	funkcija potencijala brzine strujanja difrakcijskog vala
Φ_j	m ² s	funkcija potencijala brzine strujanja radijacijskog vala
Φ_w	m ² s	potencijal brzine vala
Ψ	m ² s	strujna funkcija
∇	m ³	volumen istisnine
Fn	-	Froudeov broj
Rn	-	Reynoldsov broj
Eu	-	Eulerov broj
St	-	Strouhalov broj

SAŽETAK

Utjecaj dinamičkog opterećenja uslijed valova vrlo je značajan te ga je potrebno uzeti u obzir prilikom projektiranja brodskog trupa. To je posebno izraženo kod brodova sa širim pramčanim dijelom kao što su kontejnerski brodovi. Odziv broda na valovima vrlo je kompleksan hidrodinamički problem, a eksperimentalna ispitivanja za procjenu pomorstvenih značajki vrlo su skupa i komplicirana. Daleko jednostavniji i jeftiniji način je korištenje raznih programskih paketa.

U ovom radu dane su najvažnije definicije jednadžbe koje opisuju njihanje broda. U programskim paketima *WISDAM-X* i *HydroSTAR* izvršena je analiza odziva poniranja i posrtanja u vremenskoj domeni. Analiza je napravljena za četiri različite valne duljine pri čemu su tri analize napravljene za projektnu brzinu, a jedna za brzinu veću od projektne. Sve analize radile se odnose na pravilne valove u pramac.

Uspoređeni su odzivi poniranja i posrtanja dobiveni pomoću dva programska paketa u vremenskoj domeni te je dobiven uvid u razlike između potencijalne i viskozne teorije pri određivanju njihanja broda. Kako bi se odredila točnost dvije metode, odzivi poniranja i posrtanja dobiveni numeričkim metodama uspoređeni su s dostupnim eksperimentalnim podacima te je dobiveno zadovoljavajuće poklapanje rezultata.

Za opis stanja nekog područja plovidbe koriste se valni spektri te spektri odziva broda. Prilikom projektiranja potrebno je osigurati da se maksimalna vrijednost spektra odziva i maksimalna vrijednost prijenosne funkcije ne nalaze na istoj frekvenciji kako ne bi došlo do rezonancije. Spektri valova i spektri odziva ne ovise o vremenu nego o frekvenciji stoga su u dijagramima prikazani odzivi poniranja i posrtanja u frekvencijskoj domeni. Odzivi poniranja i posrtanja modela 1 i modela 2 dobivenih programskim paketom *HydroSTAR* u frekvencijskoj domeni uspoređeni su u dijagramima. Maksimalna amplituda odziva javlja se pri različitim frekvencijama u ovisnosti o duljini modela odnosno broda te se može zaključiti da će područje rezonancije ovisiti o glavnim dimenzijama broda.

Ključne riječi: *potencijalno strujanje, viskozno strujanje, odziv broda na valovima, prijenosna funkcija, Navier-Stokesove jednadžbe*

SUMMARY

The effect of the dynamic loads due to waves is very significant and should be taken into account in the ship hull design. This is especially important for ships with a wider bow part such as container ships. Ship response to waves is a very complex hydrodynamic problem, and experimental trials to assess the seakeeping characteristics are very expensive and complicated. Much simpler and cheaper method is to use a variety of software packages.

Most important definitions and equations for describing ship motions are given in this paper. The analysis of heave and pitch motions in time history domain is obtained in software packages *WISDAM-X* and *HydroSTAR*. The analysis is obtained for four different wavelengths where three were obtained for design speed and one was obtained for the speed greater than design speed. All analyses were made for regular head waves.

Comparison was made for the heave and pitch motions calculated in the two software packages in the time history domain to give an insight into the differences between potential and viscous theory in determining the ship motions. To determine the accuracy of the two methods, heave and pitch motions calculated by numerical methods were compared with experimental data and the comparison gave satisfactory results.

Sea state in which the ship operates is described with wave and ship response spectra. During the ship design phase it is necessary to ensure that the frequencies at which the ship response spectra and the transfer function reach maximum values are not the same frequencies to avoid resonance. The spectra of the waves and the response spectra are not time dependent but are frequency dependent so the heave and pitch motions are shown in frequency domain as well. Heave and pitch motions in frequency domain for model 1 and model 2 are calculated in the software package *HydroSTAR* and are compared in graphs. The maximum amplitude of the ship response occurs at different frequencies depending on the length of the model and the ship, so it can be concluded that the area of resonance depends on the main dimensions of the ship.

Key words: *potential flow, viscous flow, ship response to waves, transfer function, Navier-Stokes equations*

1. UVOD

Oceanski brodovi osnivaju se tako da funkcioniraju u valnom okruženju koje je često neugodno, a ponekad nepodnošljivo i opasno. Nestalna njihanja i strukturna opterećenja broda su temeljna dva problema osnivanja broda. Zbog sve većih zahtjeva za udobnost plovidbe i učinkovitost djelovanja, procjena značajki plovnog objekta s obzirom na odziv na morskim valovima ima veliki značaj u granama putničkog prijevoza i ratne mornarice [1].

Operativnost broda ovisi o pomorstvenim svojstvima broda prilikom plovidbe u području za koje je brod projektiran. Vrijeme koje brod provede na određenom stanju mora može se odrediti na temelju statističkih podataka za to područje. Metode procjene njihanja uspoređuju se s graničnim vrijednostima njihanja kako bi se zadržala zahtijevana operativnost broda [2].

Pomorstvena svojstva broda procjenjuju se na temelju promjena stanja mora u području plovidbe. U prirodi se rijetko može naići na pravilne valove stoga se stvarno stanje mora u kojem brod plovi može opisati samo statističkim modelom. Veličina amplitude njihanja procjenjuje se koristeći valne spektre, tj. raspored energije valova za to područje plovidbe te je na temelju toga moguće procijeniti i kvalitetu boravka na brodu uspoređujući procijenjene amplitude njihanja s propisanim graničnim vrijednostima.

Pomorstvenost plovnog objekta primjenjuje se u analizi njegova odziva na morskim valovima radi procjene njegove operativnosti i sigurnosti na nemirnom moru. Dostupna saznanja o teoriji njihanja koriste se u fazi osnivanja broda kao i tijekom njegove eksploatacije.

Dinamika njihanja broda opisana je jednadžbama njihanja koje uravnotežuju vanjske sile i momente koji djeluju na brod s unutrašnjim silama i momentima uslijed inercije. Pri tome se uzburkano more smatra slučajnim procesom čije se značajke mogu odrediti spektralnom analizom. Jednako tako je i odziv broda slučajan proces koji se može razmatrati sa stanovišta spektralne analize. Dobiveni rezultati omogućuju odabir pomorstveno zadovoljavajuće forme broda u ranijoj fazi projekta broda, što znatno poboljšava i olakšava konstruiranje zahtjevnijih brodova s obzirom na kriterij njihanja [1].

Pomorstvena svojstva procjenjuju se prema raznim kriterijima kao što su zadatak koji brod obavlja, uvjeti u kojima brod plovi (stanje mora, brzina vjeta, geografski položaj...), odziv broda na valovima te kriteriji pomorstvenosti. Prema tim kriterijima brod mora zadovoljiti ograničenje buke, vibracija, urona pramca te ne smije doći do neželjenog smanjenja brzine, a kriteriji se razlikuju u ovisnosti o namjeni broda.

U projektiranju broda važno je procijeniti ponašanje broda na valovima. To se može izračunati, odrediti modelskim ispitivanjima ili izmjeriti pri plovidbi.

Računski pristup može biti analitički za jednostavnije geometrije, ali za bilo kakav stvarni oblik broda potrebne su računalne simulacije. Rezultati takvih proračuna ili modelskih ispitivanja su prijenosne funkcije odnosno operatori amplitude odziva (eng. *Response Amplitude Operator - RAO*).

Njihanja broda važna su za određivanje dinamičkog opterećenja koje utječe na posadu, putnike, dijelove broda (opremu), teret te strukturne elemente. Pretjerana njihanja mogu utjecati na sposobnost broda da obavi zadatak, ali utječu i na ljude te također i zadatke koje oni trebaju obavljati na brodu [3].

Djelovanje nevremena postavlja značajno dodatno opterećenje posadi broda. Njihanja broda djeluju na ljudske psiho-motorne sposobnosti kao i na mogućnost zaključivanja i pravovremenog djelovanja. Za vrijeme nevremena, faktor rizika broda mnogostruko je uvećan zbog pojave dodatnih opterećenja kojima niti brod niti posada nisu izloženi za vrijeme plovidbe po mirnom moru [4].

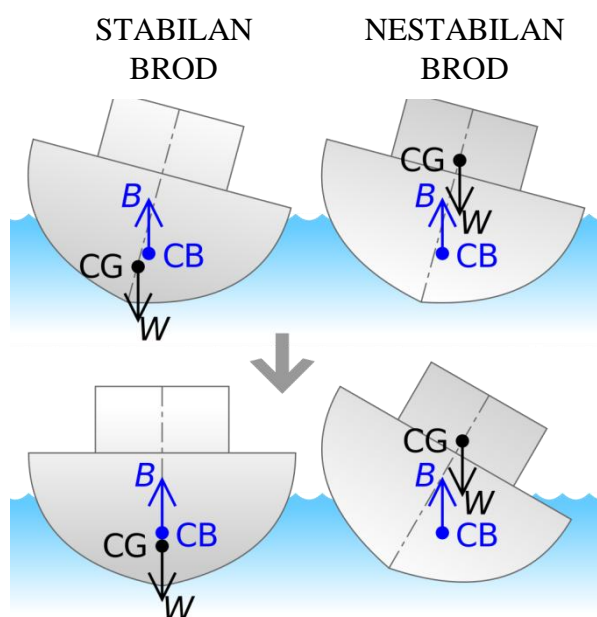
Pomorstvena svojstva direktno utječu na konstrukciju broda. Njihanje broda se uzima u obzir kada se određuju preliminarne dimenzije broda te kod rasporeda brodskih prostora, npr. kod većine brodova dijelovi oko pramca doživljavaju najveća njihanja pa su uglavnom nepovoljna za smještaj putnika ili posade. U posebnim slučajevima kada njihanja ugrožavaju posadu, strukturu, brodske strojeve ili kada onemogućavaju obavljanje zadatka, forma broda mora biti promijenjena tako da se smanje njihanja broda.

Manje amplitude njihanja znače i bolja pomorstvena svojstva pa će tako veličina i stabilitet broda uvelike utjecati na pomorstvenost. Njihanja stabilnijeg broda bolje prate profil vala pa će stabilan brod imati manje amplitude njihanja od nestabilnog. Jedan od kriterija pomorstvenosti je također i uron palube, odnosno paluba ne smije uroniti što se može osigurati većim nadvođem. Često je najvažniji faktor pomorstvenosti ljudski faktor, posebno kod manjih brodova, jer na smanjenje njihanja broda uvelike utječu iskustvo i vještina posade [3].

1.1. Stabilitet broda

Stabilitet broda je područje brodogradnje koje se bavi ponašanjem broda na mirnoj vodi i na valovima. Proračuni stabiliteta se temelje na težištu masa, težištu istisnine i metacentarskoj visini te na njihovom međusobnom utjecaju. Kod projektiranja broda potrebno je izvršiti proračune stabiliteta oštećenog i neoštećenog broda.

Ako se radi o stabilitetu neoštećenog broda proračuni su relativno jasno definirani te u obzir uzimaju težište masa i težište uzgona. Obično se uzimaju u obzir i razmještaj, ukrcaj i iskrcaj tereta te stanje mora. Teoretski stabilan brod je onaj kojemu se težište uzgona nalazi iznad težišta sistema, slika 1., no to uglavnom nije slučaj u realnosti [5].

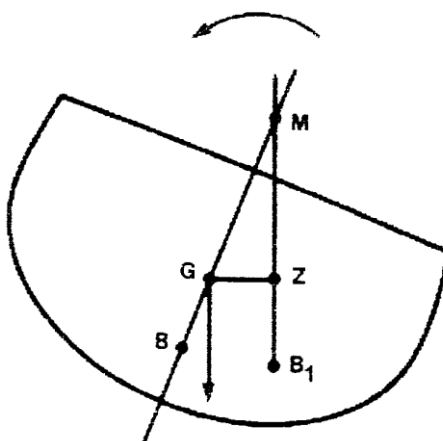


Slika 1. Prikaz teoretski stabilnog (lijevo) i teoretski nestabilnog broda (desno) [5]

Na slici 1. težište uzgona označeno je sa CB, a sila uzgona sa B (eng. *buoyancy*) dok je težište masa označeno sa CG, a težina sa W (eng. *weight*).

Kod većine brodova težište sistema odnosno masa nalazi se iznad težišta uzgona, ali brod je ipak stabilan, jer se zbog forme broda, pri nagibanju, težište uzgona pomiče prema strani koja više uranja. Kod stabilnog broda, težište uzgona se u nagnutom položaju pomakne dovoljno da sila uzgona i težina tvore spreg uslijed čega se javlja moment ispravljanja broda. Ako je brod nestabilan, spreg će tvoriti moment suprotan ispravljanju broda te će se brod sve više nagnjati.

Ako se u nagnutom položaju broda povuče vertikalna linija koja prolazi kroz težište uzgona ona će u nekoj točki sjeći simetralu broda, a ta točka naziva se metacentar [5].



Slika 2. Prikaz odnosa metacentra, težišta uzgona i težišta masa stabilnog broda [6]

Na slici 2. prikazan je primjer metacentra gdje je težište uzgona označeno s B odnosno B_1 u nagnutom stanju dok je težište masa označeno s G, a metacentar s M.

Kako bi se osigurala stabilnost broda, metacentar mora biti dovoljno iznad težišta masa.

Kod stabiliteta oštećenog broda proračuni su mnogo kompliciraniji nego kod neoštećenog broda. Uglavnom se koriste računalne numeričke metode, jer su ostale metode prezahtjevne i dugotrajne.

Do gubitka stabilnosti oštećenog broda dolazi zbog naplavljivanja. Voda se skuplja na dnu broda spuštajući težište masa i metacentar što može uzrokovati spreg sila suprotan momentu ispravljanja broda. U slučaju nagiba broda u naplavljenom stanju voda koja je ušla u prostor dna počinje se premještati u niži dio broda čime se težište sistema pomiče iz simetrale na jednu stranu. U slučaju nagibanja broda u naplavljenom stanju, brod će ostati u stanju nagiba te će na promjenu stanja utjecati bilo kakav vanjski utjecaj kao što je na primjer udar vala u bok. U slučaju naplave prostora na pramčanom ili krmenom dijelu broda, brod će se naći u stanju trima, a ako se naplavi prostor koji se ne nalazi na simetrali broda (npr. uzdužno pregrađeni tank) doći će do bočnog nagiba u kojem će brod ostati [5].

Kod trgovačkih i putničkih brodova, stabilitet oštećenog broda analizira se probabilistički, odnosno razmatraju se razni slučajevi. Stabilitet se proračunava za naplavu pojedinačnih prostora, ali i naplavu dva do tri prostora istovremeno.

1.2. Sustavi dodatnog stabiliteta

Razlozi pokušaja smanjenja njihanja raznoliki su i ovise o tipu broda. Kod putničkih brodova njihanja utječu na ugodu putovanja, na teretnim brodovima mogu uzrokovati oštećenje tereta ili sam teret može početi klizati i tako narušiti stabilitet, na ratnim brodovima njihanja mogu narušiti borbenu sposobnost posade i naoružanja i sl.. Kako bi se smanjio preveliki utjecaj valova ili vjetrova na brod se ugrađuju stabilizatori kako bi dodatno stabilizirali njihanja.

Stabilizatori njihanja ne smatraju se uobičajenim dijelom broda, jer se postavljaju isključivo u svrhu smanjenja njihanja. Primjenom stabilizatora mogu se značajno smanjiti amplituda, brzina i ubrzanja njihanja kao i neki dinamički učinci (npr. zalijevanje palube ili udaranje pramca). Teoretski je moguće stabilizirati bilo koji oblik gibanja, no pokazalo se da njihanja u horizontalnoj ravnini (zalijetanje, zanošenje i zaošijanje) nikada ne dolaze u rezonanciju, odnosno amplituda tih njihanja nikada ne prelaze amplitudu vala. Stoga njihanja u horizontalnoj ravnini obično ne predstavljaju značajan problem. Na njihanja u vertikalnoj ravnini (poniranje, ljuljanje i posrtanje) djeluju i povratne sile te se brod uslijed ta tri oblika gibanja može naći u rezonanciji. Rezonancija može uzrokovati amplitude njihanja veće od amplituda vala odnosno valnog nagiba.

Povećanje prigušenja može značajno utjecati na rezonantno gibanje samo ako je početno prigušenje malo, a amplituda njihanja na frekvencijama bliskim prirodnoj vrlo visoka. Sustav stabilizacije mora biti relativno malen da bi se postigla učinkovita stabilizacija bez velikih dodatnih masa na brodu. Te uvjete može zadovoljiti samo ljuljanje, jer ima malo prigušenje te je dovoljno malo povećanje prigušenja. Zbog manjih uzbudnih momenata u usporedbi s ostalim njihanjima, ljuljanje je najjednostavnije kontrolirati.

Prigušenje kod poniranja i posrtanja vrlo je visoko pa su za stabilizaciju tih oblika njihanja potrebne velike sile i momenti što često onemogućuje praktičnu primjenu [1].

1.2.1. Pasivni stabilizatori

Ovi sustavi zahtijevaju dodatnu energiju ili poseban sustav kontrole. Mogu se podijeliti prema tome imaju li ili nemaju pomične dijelove. Najzastupljenija sredstva pasivne stabilizacije su ljuljne kobilice i jedra [1].

Ljuljne kobilice su najjednostavnije sredstvo stabilizacije ljuljanja, često V oblika zavarene gotovo okomito na trup broda u blizini uzvoja [5]. To su zapravo fiksna krilca duljine

25÷50% duljine broda, širine između 0,3 i 0,5 m. U rijetkim slučajevima brod može imati više od jedne kobilice po strani. Moment prigušenja nastaje uslijed otpora ljuljne kobilice i promjene rasporeda tlaka na trupu zbog njenog prisustva. Takva stabilizacija ljuljanja je jeftina i jednostavna, a smanjuje ljuljanje za oko 35%. Problem ljuljne kobilice je povećanje ukupnog otpora što se može reducirati postavljanjem ljuljne kobilice tako da slijedi strujnice u tom području [1]. Na slici 3. prikazan je primjer ljuljne kobilice na teretnom brodu.



Slika 3. Primjer ljuljnih kobilica [7]

Pasivni protuljuljni tankovi nisu kontrolirani osim što se ponekad podešavaju zbog promjenjivih uvjeta opterećenja. Do stabilizacije njihovanja takvih sustava dolazi uslijed faznog pomaka između uzbudnog i stabilizacijskog momenta. Fazni pomak ta dva momenta mora biti takav da smanji ljuljanje broda. Tank sa slobodnom površinom ima jedan tank koji se obično proteže cijelom širinom broda. Tank se sastoji se od komora za vodu smještenih u gornjem dijelu broda. U-cijevni tank sastoji se od dva krilna tanka čija dna su povezana poprečnim kanalom. Tankovi su djelomično napunjeni te su otvoreni s gornje strane. Vanjski stabilizacijski tank sastoji se od dva krilna tanka koji su međusobno povezani samo zračnom cijevi pri vrhu tankova. More kroz otvore na trupu ulazi i izlazi iz tih tankova, a prisutnost morske vode može uzrokovati koroziju. Nedostatak svih pasivnih protuljuljnih tankova je taj što smanjuju metacentarsku visinu, a time smanjuju i poprečni stabilitet.

Stabilizator s pomičnim masama dopušta poprečno kretanje velikoj masi na tračnicama. Masa je prisiljena vraćati se u ravnotežni položaj zbog djelovanja opruga ili pod utjecajem zakrivljenosti tračnica, a prisutan je i prigušni mehanizam. Takav sustav stvara silu koja djeluje na masu. Djelovanje mase slično je djelovanju tekućine u protuljuljnim tankovima te je za učinkovitu stabilizaciju njihovanja potrebno osigurati odgovarajući fazni pomak uzbudnog

i stabilizacijskog momenta. U ovom slučaju pomicanje masa mora za ljućanjem zaostajati 90° da bi sustav bio učinkovit [1].

Kontrolirani pasivni stabilizatori se koriste kada kontrola ljućanja prethodno navedenim pasivnim stabilizatorima nije dovoljna. Ovakav način stabilizacije je zapravo samo poboljšanje djelovanja već spomenutih stabilizatora. Najčešće se kao kontrolirani pasivni stabilizatori koriste kontrolirani pasivni protuljućni tankovi slični u-cijevnim tankovima osim što su krilni tankovi povezani s cijevi s gornje strane te je protok između njih kontroliran ventilom.

1.2.2. Aktivni stabilizatori

Za rad aktivnog stabilizatora potrebno je uložiti snagu, veća je cijena takvih sustava ali mnogo bolje ublažavaju ljućanje od pasivnih. Svaki takav sustav sastoji se od sustava kontrole koji registrira njihanje broda te predviđa uzbudni moment ljućanja i sustava generiranja stabilizacijskog momenta. Kontrolni sustav upravlja sustavom generiranja momenta tako da smanjuje ljućanje, a može se razviti takav sustav koji će iskustveno određivati željeni komandni signal.

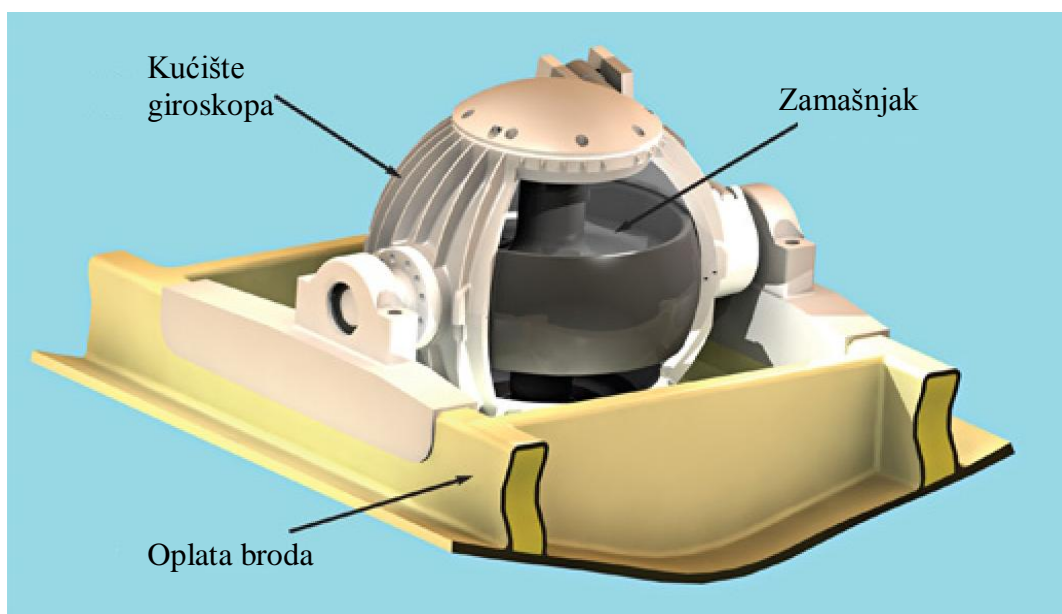
Za dobru stabilizaciju kod ovakvih je sustava nužno unaprijed poznavati uzbudni moment ljućanja.

Stabilizacijska krilca se koriste za smanjenje amplitude ljućanja koje brod doživljava tokom plovidbe ili u mirovanju. Postavljaju se po bočnoj strani trupa u blizini uzvoja. Strujanje tekućine oko krilaca uzrokuje uzgon. Geometrijski kut upada je promjenjiv, najčešće se regulira hidrauličkim pokretačem. Ovaj tip stabilizacije najučinkovitiji je pri brzinama broda $10\div 15\text{ čv}$, a uglavnom se ugrađuju na ratne i brze brodove. Na trgovačkim brodovima često se koriste uvlačiva krilca. Ona se mogu uvući u unutrašnjost trupa te tako smanjiti mogućnost oštećenja u plicim morima. Na ratne brodove najčešće se ugrađuju neuvlačiva krilca.

Na nekim brodovima na kojima je težište kormila daleko ispod središta ljućanja, postavljanje kormila pod određenim kutom može uzrokovati veliki moment ljućanja. Ako se kormilo može brzo okretati s jedne na drugu stranu, za stabilizaciju ljućanja moguće je koristiti sile na kormilu. Takav tip stabilizacije naziva se *stabilizacija kormilom* [1].

Giroskopski stabilizatori su se počeli koristiti za smanjenje amplitude ljućanja broda kasnih 1920-tih i ranih 1930-tih za ratne brodove, a nakon toga i za putničke. Ovi stabilizatori sastoje se od zamašnjaka koji slobodno rotira oko svoje osi koja je paralelna s vertikalnom osi broda i

pokretan je elektromotorom, slika 4.. Zamašnjak je učvršćen na okvir koji se može okretati oko horizontalne osi okomite na uzdužnu os broda pri čemu postoji prigušenje [5]. Kada se brod ljulja vanjski moment djeluje na okvir giroskopa i uzrokuje zakretanje oko vertikalne osi zamašnjaka. Ako se tom zakretanju pruži otpor reakcija okvira tvori spreg sila koja djeluje u suprotnom smjeru od ljuljanja. Što je veći uzbudni moment, veća je i sila otpora žiroskopa prema vanjskom utjecaju, a u ovom slučaju i veća mogućnost smanjenja ljuljanja [1].



Slika 4. Prikaz giroskopskog stabilizatora [8]

Aktivni stabilizacijski tankovi koriste aksijalnu pumpu koja tjera vodu iz tanka u tank. Problem ovog sustava je vrijeme koje je potrebno da voda pređe iz jednog u drugi tank nakon paljenja pumpe te se zbog toga ovakav tip stabilizatora ne koristi često [1].

1.2.3. Stabilizacija posrtanja

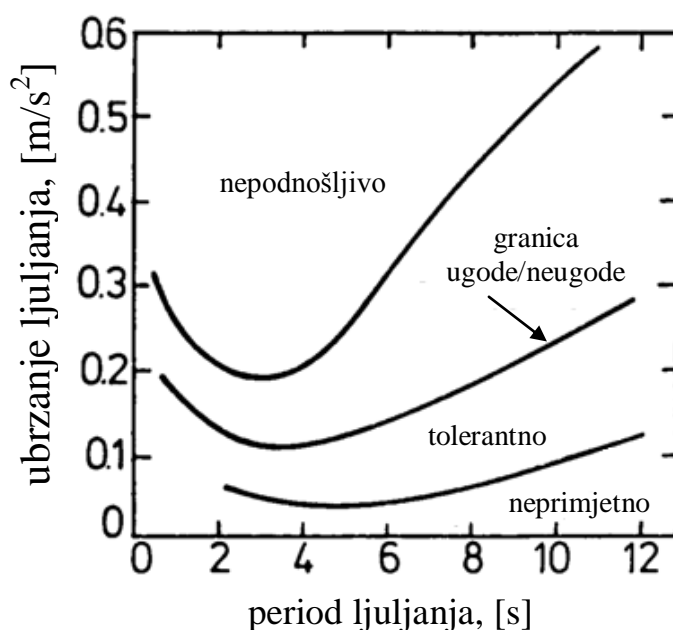
Valne sile i momenti posrtanja mnogo su veći nego kod ljuljanja. Kao jedno od učinkovitih rješenja za smanjenje posrtanja pokazalo se postavljanje *fiksni krilaca u blizini pramca*. Tijekom posrtanja gibanje pramca je izvan faze nailazećih valova te je relativna vertikalna brzina na tom položaju veća. Zbog toga se na fiksnim krilcima razvijaju velike sile i momenti posrtanja te se javljaju vibracije i povećan otpor uslijed strujanja oko krilaca.

Vrlo veliki pramčani bulbovi dijelom prigušuju posrtanje no isto tako povećavaju moment tromosti posrtanja kao i dodatni moment tromosti što povećava prirodni period [1].

2. TEORIJA NJIHANJA BRODA NA VALOVIMA

U stvarnim uvjetima plovidbe, brodski trup izložen je nepravilnim opterećenjima. Od svih vanjskih utjecaja, najznačajniji za projektiranje trupa je utjecaj dinamičkih valnih opterećenja. Valna opterećenja posebno utječu na brodove za prijevoz kontejnera zbog veće širine pramca. Ponašanje broda na moru ima veliki utjecaj na sigurnost putnika, posade, tereta i broda. Sigurnost broda uvelike ovisi o njihanju broda, a posebno o ljuljanju. Ako se ljuljanje broda spregne sa bočnim opterećenjem uslijed vjetrova, može doći do opasnih kutova ljuljana, čak i do prevrtanja broda.

Važna značajka njihanja broda je uгода ljudi na brodu u plovidbi. Brodovi velike metacentarske visine mogu biti veoma neugodni za ljude, jer se u tom slučaju javljaju velike akceleracije na malim kutovima ljuljanja. Na slici 5. prikazana je ovisnost veličine akceleracije ljuljanja o periodu ljuljanja i razina ugrade za ljude [9].



Slika 5. Razine ugrade za ljude na brodu [9]

Važnost smanjenja amplitude njihanja do izražaja najviše dolazi kod brzih kontejnerskih brodova i tankera velikih dimenzija. Problem njihanja kontejnerskih brodova očituje se u oštećenju kontejnera na palubi, jer zbog velikih amplituda njihanja dolazi i do velikih ubrzanja na palubi. U nekim slučajevima uslijed ljuljanja može doći i do ispadanja tereta u more. Teorija njihanja i opterećenja može poslužiti kao korisno sredstvo za određivanje

pomorstvenih značajki broda. Uz poznavanje geometrijskih značajki i rasporeda masa na brodu te poznavanje stanja mora u kojem brod plovi, moguće je procijeniti njihanja i dinamička opterećenja broda te ih usporediti s odgovarajućim kriterijima [1].

Kada na mirujuće tijelo naiđe val on će dio svoje energije predati tom tijelu te će se tijelo početi oscilacijski gibati. Ta energija gibanja jednaka je razlici energije vala prije i nakon susreta s tijelom. Tijelo uslijed njihanja emitira energiju koja se radijalno širi u svim horizontalnim smjerovima. Gubitak energije vala osim njihanja tijela uzrokuje i smanjenje amplitude vala, ali valna duljina ostaje ista. Takva promjena naziva se difrakcija ili lom vala. Energija radijacije valova očituje se u prigušenju njihanja tijela te u prividnom povećanju mase tijela prilikom njihanja. Periodično ponavljanje prijenosa energije između sustava progresivnih harmonijskih valova i uronjenog tijela uzrokuje oscilatorno gibanje tijela odnosno njihanje. Njihanja broda definirana su sa šest stupnjeva slobode pomaka te odgovarajućim brzinama i ubrzanjima [1].

Sustav interakcije vala i tijela vrlo je složen pa je potrebno uvesti neka pojednostavljenja. Ovisno o odnosu geometrije tijela i vala mogu se definirati područja primjene različitih modela i teorija koje opisuju interakciju tijela i vala. U nekim slučajevima može se zanemariti utjecaj viskoznih sila dok u nekim slučajevima na njihanje tijela prvenstveno utječu viskozne sile ili napetost površine [10].

2.1. Morski valovi

Kako bi se razumjeli efekti njihanja broda na valovima odnosno ponašanje broda u nevremenu, potrebno je razumjeti nastanak i djelovanje morskih valova. Valovi mogu nastati na mnogo različitih načina te mogu biti razilazni, difrakcijski, vjetrovni, plimni i sl. [4]

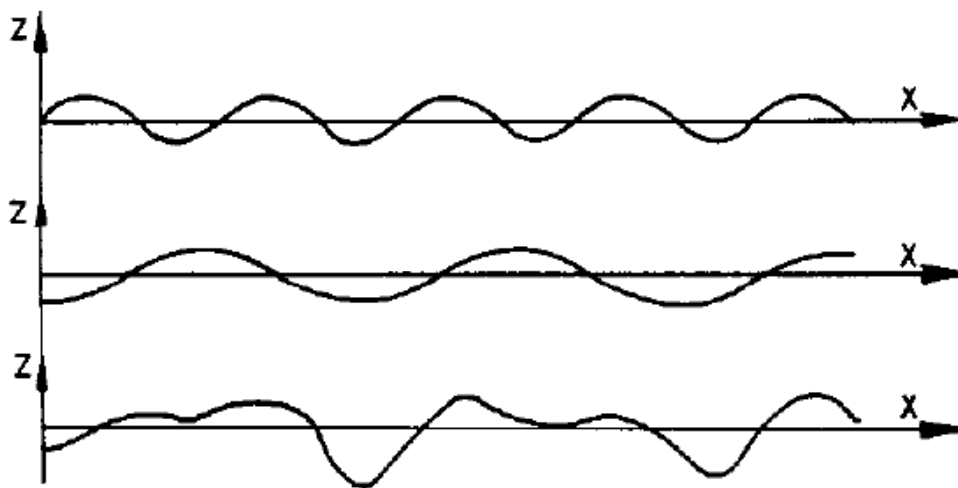
Najznačajniji u smislu pomorstvenosti su vjetrovni valovi. Vjetrovni valovi nastaju uslijed djelovanja vjetra zbog čega dolazi do promjene tlaka zraka na morskoj površini. Na mjestu sniženog tlaka zraka uzdiže se stupac vode koji se zatim prenosi s jednog mjesta na drugo.

Vjetrovni valovi su kratkih brijegova (eng. *short crested*) te postoji veća raspostranjenost po smjerovima različitih valnih sustava s obzirom na smjer puhanja vjetra. Kod pravilnih harmonijskih valova ne postoji raspostranjenost po smjerovima budući da se promatra samo jedan valni sustav - sinusoidalni val u jednom smjeru koji ima konstantnu valnu visinu, duljinu i period [9]. Što je manja raspostranjenost po smjerovima to su valovi duljih brijegova (eng. *long crested*) tako da pravilni sinusoidalni val u teoriji ima beskonačnu duljinu brijegova. Individualne grupe valova se rasprostiru u različitim smjerovima što može

iznositi i razliku od nekoliko desetaka stupnjeva od glavnog smjera vjetra. U općem slučaju, realno stanje mora je zapravo superpozicija pravilnih valova [4].

Vjetrovni valovi su izrazito nepravilni i nemoguće je predvidjeti kada će nastupiti izrazito velik val niti kada će točno nastupiti najveći val. Statistički se može samo ustanoviti koliko se takvih valova može pojaviti u određenom vremenu. Budući da su vjetrovni valovi nepravilni, njihovi periodi se stalno mijenjaju pa tako i njihove duljine [4].

Nepravilni valovi mogu se prikazati kao superpozicija pravilnih sinusoidalnih valova malih valnih visina što je prikazano na slici 6. Takvi pravilni valovi važan su parametar za računalne metode linearne teorije valova. Superpozicija velikog broja pravilnih valova može vrlo dobro opisati stvarno stanje mora. Fazni pomak između tih pravilnih valova ovisi o vremenu i lokaciji te je nasumično određen za stanje mora u trenutku $t = 0$ [11].



Slika 6. Primjer superpozicije pravilnih valova [4]

Čak i uz tako malen broj komponenata morskog vala uočava se nepravilnost rezultirajućeg valnog profila. Valovi relevantni u pomorstvenosti su valovi uzrokovani gravitacijskim silama, a površinska napetost, stlačivost fluida te viskoznost mogu se zanemariti. Općenito se pravilni valovi mogu opisati valnim brojem k , valnom frekvencijom ω i brzinom napredovanja vala c , kako slijedi [11]:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T_{val}} \quad (2)$$

$$c = \frac{\lambda}{T_v} = \frac{\omega}{k} \quad (3)$$

gdje je:

λ - valna duljina,

T_v - valni period.

Val je definiran u nepomičnom koordinatnom sustavu te se može opisati jednadžbom profila vala [1]:

$$\zeta(t) = \zeta \cos(\omega t - kx_0) \quad (4)$$

gdje je:

$\zeta(t)$ - valna amplituda ovisna o vremenu,

ζ - valna amplituda,

x_0 - koordinata x nepomičnog koordinatnog sustava.

2.2. Kursni kut i susretna frekvencija

Frekvencija valova i frekvencija njihanja tijela u većini slučajeva nisu jednake. Susretna frekvencija ovisi o valnoj frekvenciji ω , brzini broda u te kutu nailaska broda na valove β . Isto tako najčešće ni period vala neće biti jednak periodu njihanja broda [1].

Susretni ili kursni kut β je kut koji zatvaraju vektor brzine broda i vektor brzine vala. Kursni kut jednak je nuli za krmene valove dok je za pramčane valove 180° ili π [4].

Susretni ili kursni kutovi definirani su kao:

- valovi u krmu $\beta = 0^\circ \div 30^\circ$ odnosno $\beta = 330^\circ \div 360^\circ$,
- valovi koso u krmu $\beta = 30^\circ \div 60^\circ$ odnosno $\beta = 300^\circ \div 330^\circ$,
- bočni valovi $\beta = 60^\circ \div 120^\circ$ odnosno $\beta = 240^\circ \div 300^\circ$,
- valovi koso u pramac $\beta = 120^\circ \div 150^\circ$ odnosno $\beta = 210^\circ \div 240^\circ$,
- valovi u pramac $\beta = 150^\circ \div 180^\circ$ odnosno $\beta = 180^\circ \div 210^\circ$.

Relativna brzina broda u odnosu na valove je:

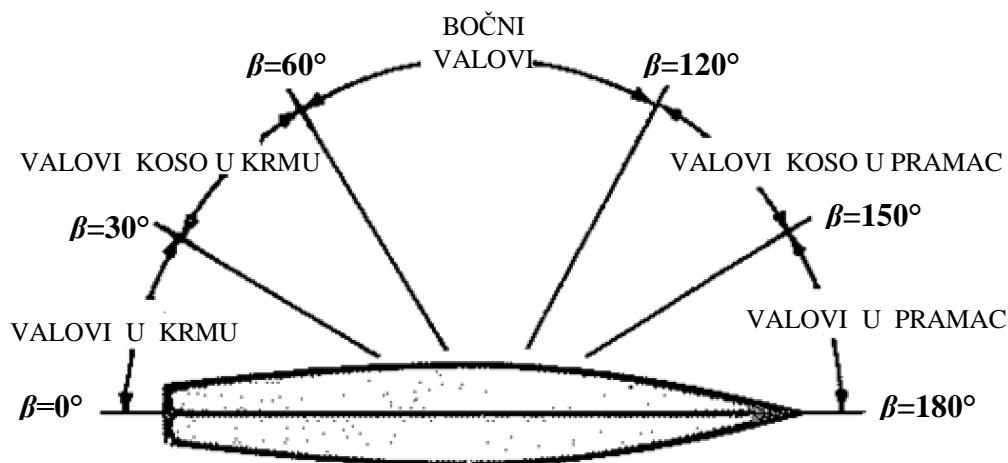
$$u_e = c - u \cos \beta \quad (5)$$

gdje je:

u_e - relativna brzina broda,

c - brzina napredovanja vala,

u - brzina broda.



Slika 7. Susretni kutovi broda i valova [10]

Period vala izražen je kao omjer valne duljine i valne brzine, a analogno tome susretni period izražava se kao omjer valne duljine i susretne odnosno relativne brzine broda [1]:

$$T_e = \frac{\lambda}{u_e} = \frac{\lambda}{c - u \cos \beta} = \frac{T_v}{1 - \left(\frac{u}{c}\right) \cos \beta} \quad (6)$$

gdje je:

T_e - susretni period,

λ - valna duljina,

T_v - valni period.

Iz jednadžbe (6) moguće je dobiti izraz za susretnu frekvenciju [1]:

$$\omega_e = \frac{2\pi}{T_e} = \frac{2\pi(c - u \cos \beta)}{\lambda} = \omega - ku \cos \beta \quad (7)$$

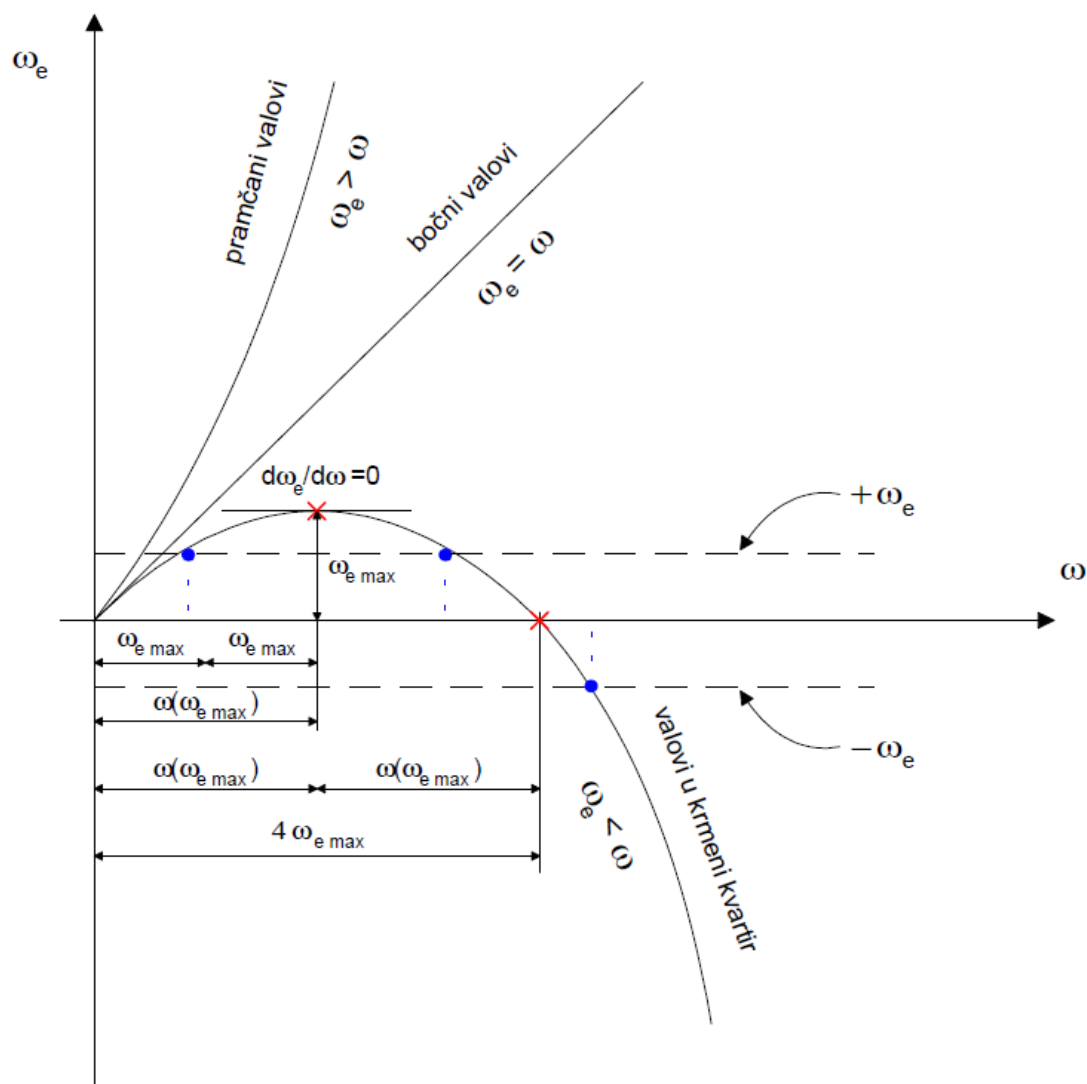
$$k = \frac{\omega^2}{c} \quad (8)$$

gdje je:

ω_e - susretna frekvencija,

ω - valna frekvencija,

k - valni broj.



Slika 8. Utjecaj kursnog kuta na susretnu frekvenciju [4]

Iz jednadžbe (7) može se vidjeti da će valna i susretna frekvencija imati jednaku vrijednost u slučaju nailaznih valova pod kutom od 90° ili 270° . U slučaju kada je brzina broda jednaka brzini vala $u \cdot \cos \beta = c$, za valove u krmu, susretna frekvencija biti će jednaka nuli. Kada brod miruje odnosno kada mu je brzina u jednaka nuli, valna i susretna frekvencija poprimit će istu vrijednost. Također se može vidjeti da je za valove u pramčani dio broda

$(\beta = 90^\circ \div 270^\circ)$ $\cos \beta$ poprima negativne vrijednosti što znači da će susretna frekvencija kod nailaska valova u pramac uvijek biti veća od susretne frekvencije kod nailaska valova u krmu.

Iz slike 8. vidi se da se za tri različita valna sustava u krmu može pojaviti jednaka apsolutna vrijednost susretne frekvencije. U slučaju valova u pramac i bočnih valova, jednoj susretnoj frekvenciji pridružuje se jedan sustav valova [4].

Rezonancija svakog prirodnog sustava nastaje u trenutku kad frekvencija uzbude (u ovom slučaju vala) postane jednaka njegovoj vlastitoj frekvenciji. Vlastita, prirodna ili rezonantna frekvencija je ona kojom se sustav njiše, vibrira ili oscilira bez da na njega djeluje uzbuda. Manja metacentarska visina znači manja ubrzanja na palubi što je poželjno kod teretnih brodova kao što su kontejnerski, a to također znači i veće periode ljuljanja. Kod takvih je brodova veća vjerojatnost da se nađu u rezonantnom području kada valovi dolaze u krmu [4].

2.3. Model njihanja

Dinamička opterećenja i njihanje broda na valovima složeni su hidrodinamički problemi. Kako bi se procijenile pomorstvene karakteristike broda, odziv na valovima prikazuje se kao zbroj odziva broda na harmonijskim valovima različitih frekvencija što omogućuje dovoljno dobru procjenu vertikalnih, ali i horizontalnih gibanja i opterećenja. Odziv broda na morskim valovima procjenjuje se kroz statističku analizu za određeno stanje mora.

Osim što uzrokuje njihanje broda, energija vala predana brodu sastoji se od energije inercijskih sila, energije povratnih sila nastalih pomakom tijela iz ravnotežnog položaja te energije valova koji se šire oko broda prilikom njihanja tj. valova radijacije. Energija radijacijskih valova uzrokuje prigušenje njihanja broda, obzirom da brod dio energije njihanjem predaje valovima, te prividno povećanje mase broda. Hidrodinamička dodatna masa broda odnosi se na postojanje dodatne sile koje ubrzava okolnu vodu i trup broda prilikom njihanja, a koja je u fazi s ubrzanjem njihanja tijela.

Brod se u teoriji njihanja smatra krutim tijelom odnosno pretpostavlja se da elastični harmonijski pomaci trupa nemaju velikog utjecaja na njihanja broda. Prema tome dinamika fluida i njihanja krutog tijela nastaju kombiniranim djelovanjem različitih vanjskih sila i momenata kao i tromosti samog tijela [4]. Njihanje tijela pod djelovanjem morskih valova zbiva se na granici dvaju medija. Razlika u specifičnoj gustoći tih dvaju medija je vrlo velika

pa je mehanizam njihanja vrlo složene prirode. Potrebno je pojednostaviti opis pojave uvođenjem pretpostavki te svesti fizikalni model njihanja na jednostavniji matematički opis.

2.3.1. Oblici njihanja

Gibanja u smjerovima koordinatnih osi rezultat su superpozicije translacijskih i rotacijskih njihanja. U smjeru osi x gibanje je superpozicija zalijetanja, posrtanja te zaošijanja, u smjeru osi y zanošenja, ljuljanja i zaošijanja, a u smjeru osi z poniranja, ljuljanja i posrtanja. Vertikalna njihanja broda nemaju velik utjecaj na sile i momente koji se javljaju u poprečnoj ravnini, zbog simetrije broda oko uzdužne osi dok poprečna njihanja imaju značajniji utjecaj na sile i momente u vertikalnoj ravnini [4].

Njihanje tijela $\eta_j(t)$ odnosno njegovo oscilacijsko gibanje tijela opisano je zakonom koji se može prikazati u kompleksnom obliku [1]:

$$\eta_j(t) = \text{Re}\{\delta_j e^{-i\omega_e t}\} = \eta_{Cj} \cdot \cos(\omega_e t) + \eta_{Sj} \sin(\omega_e t) = \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j) \quad (9)$$

$$\delta_j = \delta_j^{\text{Re}} + i\delta_j^{\text{Im}} = \eta_{Cj} + i\eta_{Sj} \quad (10)$$

$$e^{-i\omega_e t} = \cos(\omega_e t) - i \cdot \sin(\omega_e t) \quad (11)$$

$j=1\dots 6$

gdje je:

δ_j - kompleksna amplituda njihanja,

$e^{-i\omega_e t}$ - vremenska harmonijska funkcija,

ω_e - kružna frekvencija harmonijskog njihanja, jednaka susretnoj kružnoj frekvenciji,

η_{aj} - realna vrijednost amplitude njihanja,

ε_j - fazni pomak u odnosu na nailazeći val.

Realne vrijednosti amplitude njihanja i fazni pomak dani su slijedećim izrazima [1]:

$$\eta_{aj} = \sqrt{\eta_{Cj}^2 + \eta_{Sj}^2} \quad (12)$$

$$\varepsilon_j = \frac{\eta_{Sj}}{\eta_{Cj}} \quad (13)$$

Rezultirajuća njihanja broda sastoje se od triju translacijskih i triju rotacijskih njihanja u smjeru i oko koordinatnih osi.

Translacijska njihanja su:

- zalijetanje (eng. *surge*) u smjeru osi x :

$$\eta_1(t) = \eta_{a1} \cos(\omega_e t + \varepsilon_1) \quad (14)$$

- zanošenje (eng. *sway*) u smjeru osi y :

$$\eta_2(t) = \eta_{a2} \cos(\omega_e t + \varepsilon_2) \quad (15)$$

- poniranje (eng. *heave*) u smjeru osi z :

$$\eta_3(t) = \eta_{a3} \cos(\omega_e t + \varepsilon_3) \quad (16)$$

Rotacijska njihanja su:

- ljuľanje (eng. *roll*) oko osi x :

$$\eta_4(t) = \eta_{a4} \cos(\omega_e t + \varepsilon_4) \quad (17)$$

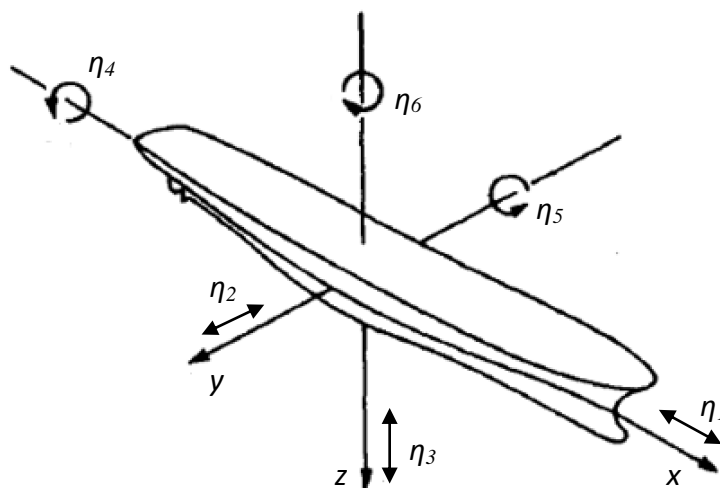
- posrtanje (eng. *sway*) oko osi y :

$$\eta_5(t) = \eta_{a5} \cos(\omega_e t + \varepsilon_5) \quad (18)$$

- zaošijanje (eng. *heave*) oko osi z :

$$\eta_6(t) = \eta_{a6} \cos(\omega_e t + \varepsilon_6) \quad (19)$$

Svaki od šest oblika gibanja η_j pomaknut je za različit fazni kut ε_j u odnosu na val. Na slici 9. prikazano je svih šest stupnjeva slobode gibanja:



Slika 9. Šest stupnjeva slobode njihanja [11]

Brzine i ubrzanja pojedinih njihanja dobivaju se kao prva, odnosno druga derivacija odgovarajućeg njihanja.

2.3.2. Prijenosna funkcija

Odziv broda na valovima uobičajeno se prikazuje prijenosnim funkcijama H_{η_a} odnosno operatorima amplitude odziva *RAO* (eng. *response amplitude operator*). Prvi korak procjene pomorstvenih svojstava je određivanje amplituda odziva njihanja te faze i frekvencijskog raspona za svih šest stupnjeva slobode gibanja. Operator amplitude odziva je funkcija koja svodi trodimenzijskih njihanja broda na njihanja u smjeru ili oko jedne osi te je različita funkcija za svaki od šest oblika njihanja [2].

Prijenosne funkcije za određeni raspon frekvencija nailaznih harmonijskih valova prikazuju bezdimenzijske amplitude odziva gibanja, brzine i ubrzanja tijela na valovima.

Operator amplitude odziva prikazuje se kao:

$$RAO = \left| \frac{\eta_a}{\zeta_a} \right|^2 = H_{\eta_a}^2 \quad (20)$$

gdje je η_a amplituda odziva.

U slučaju translacijskih gibanja, za određivanje bezdimenzijske prijenosne funkcije vrijedi izraz (20) dok je za bezdimenzijsku prijenosnu funkciju rotacijskih gibanja potrebno koristiti slijedeći izraz, [1]:

$$H_{\eta_a} = \frac{\eta_a}{k\zeta_a} \quad (21)$$

Odziv broda definiran je harmonijskim funkcijama te ovisi o amplitudama i faznim pomacima koji se određuju zasebno za različite frekvencije i smjerove nailaznih valova. Prijenosne funkcije njihanja broda potrebno je određivati za svaku pojedinu brzinu broda i susretni kut.

Poniranje, ljuljanje i posrtanje potrebno je detaljnije razmatrati, jer se pokazalo da samo kod njihanja u vertikalnoj ravnini dolazi do rezonancije. Ta su tri gibanja izložena povratnim silama te imaju vlastitu frekvenciju koja se može približiti valnoj [12].

3. ODREĐIVANJE ODZIVA BRODA

3.1. Uvod

Problem plovidbe broda na valovima ima veliku važnost u brodskoj hidrodinamici. U realnom okruženju, odziv broda na valovima je nelinearan i veoma zahtjevan problem. Pri projektiranju broda od velike je važnosti odrediti pouzdanu metodu predviđanja pomorstvenih svojstava u realnom okruženju. Uobičajen pristup rješavanju tog problema može se podijeliti na viskozan i neviskozan pristup. Bez obzira na zanemarivanje viskoznosti, neviskozne metode imaju vrlo široku primjenu zbog svoje učinkovitosti te se mogu temeljiti na panelnoj metodi ili na metodi polja. Obe metode neviskoznog strujanja su potencijalne metode, no panelna metoda pokazala se učinkovitijom od metode polja jer Eulerove jednačbe koje metoda polja rješava nailaze na slične probleme koji se javljaju kod viskoznih pristupa [13].

Nelinearnost problema može se prikazati kao superpozicija odziva na pravilnim valovima različitih frekvencija i kutova nailaska valova. Uvođenjem odgovarajućih korekcija u obzir se uzimaju karakteristike fluida kao što su viskoznost fluida ili vremenski ovisna promjena položaja te tada vremenska funkcija poprima harmonijski odnosno sinusoidalni oblik [11]. Navier-Stokesove jednačbe i jednačba kontinuiteta u osnovi su dovoljne za opis svih karakterističnih strujanja oko broda te za laminarno strujanje daju veoma pouzdane rezultate [14]. Navier-Stokesove jednačbe uglavnom se koriste za rješavanje vrlo nelinearnih problema slobodne površine dok se za pomorstvena svojstva u praksi koristi većinom potencijalna teorija. Potencijalnom teorijom mnogo brže se rješava problem pomorstvenosti, jer je potrebno riješiti samo jednu diferencijalnu jednačbu za razliku od Navier-Stokesovog pristupa koji ih koristi više. U potencijalnom pristupu potrebno je definirati samo granicu promatranog tijela umjesto cijelog područja fluida [11].

Potencijalna teorija daje rezultate manje točnosti u usporedbi s Navier-Stokesovim jednačbama, jer zanemaruje viskoznost i stlačivost fluida. Za stacionarne probleme, strujanje je bezvrtložno. Uvjet stacionarnosti bit će zadovoljen ako su tlak ili brzina fluida konstantne vrijednosti. Da bi se zadovoljili odgovarajući uvjeti, gradijenti svih varijabli fluida moraju biti konstantni. Zadovoljavanje zakona očuvanja masa znači i zadovoljenje zakona očuvanja momenta i energije stoga jednačbe potencijalne teorije poprimaju oblik Eulerovih jednačbi koje su proizašle iz pojednostavljenja Navier-Stokesovih jednačbi. Nepouzdanost rezultata u potencijalnoj teoriji očituje se kod nepravilnosti kao što su udarni valovi (eng. *shock waves*),

udaranje pramca u val (eng. *slamming*) i sl. jer u takvim slučajevima dolazi do promjene entropije [14]. Obzirom da nelinearno strujanje ima značajan utjecaj na dodatni otpor, posebno na valovima male duljine, linearnom teorijom ne može se odrediti dovoljno točno dodatni otpor.

Kako bi se povećala točnost određivanja odziva broda na valovima, potrebno je promatrati problem kao nelinearan i nestacionaran. Između svih metoda rješavanja nelinearnog problema u vremenskoj domeni, CFD (eng. *Computational Fluid Dynamics*) se smatra najtočnijim.

CFD su računalne metode određivanja hidrodinamičkih značajki koje se temelje na numeričkom rješavanju problema pomorstvenosti ali za razliku od potencijalne metode, koriste se Navier-Stokesove jednačbe. Služe za rješavanje vrlo zahtjevnih problema za koje ne postoje analitička rješenja i znatno ubrzavaju proces analize. CFD koristi numeričke metode i algoritme za rješavanje i analiziranje problema koji se odnose na strujanje fluida [14].

3.2. Potencijalna teorija

Kako bi se odredila svojstva valova te procijenila njihanja i opterećenja plovnih objekata razvila se hidrodinamička teorija poznatija pod nazivom teorija potencijalnog strujanja (eng. *potential flow theory*). Potencijalno strujanje odnosi se na idealni fluid čije karakteristike su homogenost, neviskoznost i nestlačivost. Teorija potencijalnog strujanja daje uvid u sliku strujanja oko uronjenog tijela te značajke nailaznih valova bez obzira na ograničenja.

U potencijalnoj teoriji pretpostavlja se bezvrtložno strujanje fluida što znači da rotacija čestica ne postoji. Polje brzina se u tom slučaju može opisati potencijalom brzina $\Phi(x, y, z; t)$ što označava neprekinutu skalarnu funkciju koja ima konačnu vrijednost u svakoj točki tekućine i definira vektor brzine u toj točki. Takvo se strujanje naziva potencijalnim strujanjem.

Za bezvrtložno strujanje vrijedi [1]:

$$\text{rot } \vec{v} = \nabla \times \vec{v} = 0 \quad (22)$$

gdje je \vec{v} vektor brzine strujanja fluida.

Slijedi:

$$\left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \vec{k} = 0 \quad (23)$$

gdje su v_x, v_y i v_z komponente vektora brzine strujanja u smjeru koordinatnih osi, a \vec{i}, \vec{j} i \vec{k} jedinični vektori u smjeru koordinatnih osi.

Potencijal brzine strujanja matematička je funkcija bez fizikalnog značenja no ima svojstvo da je brzina u bilo kojem smjeru iz određene točke fluida jednaka derivaciji funkcije potencijala u tom smjeru, [1]:

$$\begin{aligned} v(x, y, z; t) &= \text{grad } \Phi(x, y, z; t) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \Phi(x, y, z; t) \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \Phi(x, y, z; t) \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \Phi(x, y, z; t) \vec{k} \\ &= v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k} \end{aligned} \quad (24)$$

Strujna funkcija Ψ definira količinu tekućine između dvije strujnice te se i ona može definirati matematičkom funkcijom za koju vrijedi:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ v_y &= -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{aligned} \quad (25)$$

Izrazi vrijede za dvodimenzionalno strujanje odnosno za $v_z = 0$. Strujnica je krivulja za koju vrijedi $\Psi = \text{const}$. Volumen fluida između dvije strujnice proporcionalan je razlici vrijednosti strujnih funkcija između tih strujnica.

Uvjet da u fluidu ne postoji neispunjen prostor naziva se kontinuitet mase fluida. On je definiran zakonom očuvanja mase odnosno jednačbom kontinuiteta. Pretpostavlja se da je idealni fluid nestlačiv što znači da ukupna promjena protoka unutar određenog elementarnog volumena mora biti jednaka nuli.

Količina idealnog fluida koja je ušla u elementarni volumen mora iz njega i izaći. Jednačba kontinuiteta određuje se na temelju sume protoka fluida u sva tri smjera elementarnog volumena. Gustoća nestlačivog fluida je konstantna za razliku od gustoće stlačivog fluida koja je funkcija položaja unutar elementarnog volumena. Jednačba kontinuiteta homogenog nestlačivog fluida poznata je kao Laplaceova jednačba [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{v} &= \Delta \Phi = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

gdje je Δ Laplaceov operator.

Sve harmonijski promjenjive veličine u linearnom su odnosu s elevacijom odnosno amplitudom vala ζ . Kako bi se u proračunu mogli zanemariti svi kvadratni članovi u opisu vala potrebno je pretpostaviti male valne visine, a time i male valne strmine.

Kako bi bilo moguće odrediti značajke vala preko potencijala brzine Φ_w kao harmonijske funkcije potencijal brzine vala mora zadovoljiti četiri rubna uvjeta [1]:

1. Uvjet kontinuiteta za koji vrijedi da je divergencija vektora brzine strujanja jednaka nuli:

$$\nabla^2 \Phi_w = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} = 0 \quad (27)$$

2. Uvjet nepromočivosti na dnu za koji vrijedi da je vertikalna komponenta brzine strujanja čestice fluida na dnu jednaka nuli:

$$v_z = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0 \quad \text{za } z = -d \quad (28)$$

3. Dinamički uvjet na slobodnoj površini za koji vrijedi da je tlak na slobodnoj površini jednak atmosferskom:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad \text{za } z = 0 \quad (29)$$

4. Kinematički uvjet za koji čestica fluida na slobodnoj površini ima vertikalnu komponentu brzine jednaku vertikalnoj brzini slobodne površine:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad \text{za } z = \zeta \quad (30)$$

Prema ta četiri uvjeta, potencijal brzine za ograničenu vodu može se izraziti kao:

$$\Phi_w(x, z; t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (31)$$

gdje je:

ζ_a - jedinična valna amplituda,

ω - valna frekvencija,

k - valni broj,

d - dubina vode,

g - ubrzanje Zemljine sile teže.

U vodi neograničene dubine izraz $\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd}$ u jednadžbi potencijala brzine strujanja (31) poprima oblik e^{kz} .

Uvrštavanjem jednadžbe (30) u jednadžbu za potencijal brzine (31) dobije se odnos između valne duljine i valnog perioda za proizvoljnu dubinu iz čega slijedi izraz za disperzivnu jednadžbu [1]:

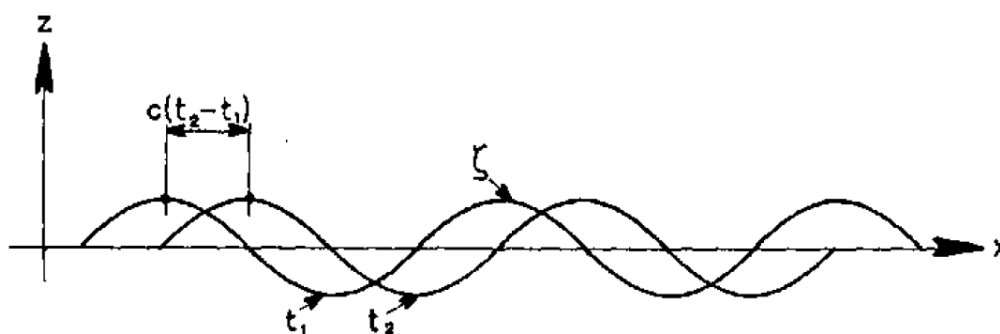
$$\omega^2 = kg \operatorname{th}(kd) \quad (32)$$

Iz potencijala brzine strujanja moguće je odrediti brzine i ubrzanja čestica fluida, hidrostatički i hidrodinamički tlak koji djeluje na određenoj dubini, energiju vala i brzinu kojom se ona prenosi.

3.2.1. Linearna teorija valova

Za što jednostavniji opis modela strujanja fluida oko broda u plovidbi na valovima, uz zadovoljavajuću točnost, koristi se linearna ili Airyeva teorija valova. Ta se teorija temelji na određenim pretpostavkama i pojednostavljenjima i temelji se na potencijalnom strujanju. Za objašnjenje strujanja i svih pojava u valu u linearnoj teoriji koristi se model harmonijskog progresivnog vala [1].

Na slici 10. prikazano je napredovanje harmonijskog vala u smjeru osi x . Profil vala zabilježen je u dva različita vremenska trenutka t_1 i t_2 [4].



Slika 10. Prikaz napredovanja harmonijskog progresivnog vala [4]

Pretpostavka linearne teorije je da je amplituda vala dovoljno mala u odnosu na valnu duljinu i dubinu vode odnosno da je brzina čestice vala također dovoljno mala u odnosu na brzinu vala [1]. Ta pretpostavka omogućava linearizaciju koja je neophodna za opisivanje stanja mora. Linearizacijom se pretpostavlja ciklička uzbuda koja uzrokuje sustav od beskonačno

mного progresivnih valova. Svaki val tog sustava ima jednaku amplitudu, duljinu i frekvenciju te je sinusoidalnog oblika [12].

Linearna teorija valova temelji se i na Eulerovoj i Bernoullijevoj jednadžbi. Eulerova jednadžba definira ravnotežu sila na materijalnoj čestici fluida. Komponenta sile u određenom smjeru uslijed djelovanja hidrodinamičkog tlaka na materijalnu česticu jednaka je umnošku mase diferencijalnog volumena te ubrzanja čestice u definiranom smjeru. U općenitom vektorskom obliku Eulerova jednadžba glasi [1]:

$$\nabla p = \rho \frac{D}{Dt} \vec{v} \quad (33)$$

gdje je:

$\frac{D}{Dt}$ - brzina promjene fizikalnog svojstva čestice fluida odnosno materijalna derivacija,

ρ - gustoća fluida,

p - tlak.

Bernoullijeva jednadžba predstavlja zakon očuvanja energije strujanja po jedinici mase fluida i pretpostavlja strujanje bez trenja. U slučaju stacionarnog potencijalnog strujanja nestlačive idealne tekućine ukupna energija fluida duž strujnice je konstantna pa vrijedi [1]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} + gz = \text{Const.} \quad (34)$$

gdje je z geodetska visina

U slučaju nestacionarnog strujanja izraz (34) ovisan je isključivo o vremenu t [1]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} + gz = C(t) \quad (35)$$

3.2.2. Princip rada programskog paketa *HydroSTAR*

U programskom paketu *HydroSTAR* strujanje je idealizirano te se analizira pomoću dva modela: strujanje oko nepomičnog tijela te strujanje tijela koje se njiše u mirnoj tekućini [1].

U prvom modelu na tijelo koje miruje nailazi val. Uzbudna sila i moment kojim val djeluje na tijelo određuju se integracijom tlaka po oplakanoj površini tijela, a nailazni val i njegova difrakcijska komponenta formiraju sliku strujanja oko tijela. Strujanje oko nepomičnog modela opisuje se funkcijom potencijala brzine strujanja nailaznog vala te funkcijom potencijala brzine strujanja njegove difrakcijske komponente:

$$\Phi(x, y, z; t) = \Phi_0(x, y, z; t) + \Phi_7(x, y, z; t) \quad (36)$$

gdje je:

Φ_0 - funkcija potencijala brzine strujanja nailaznog vala,

Φ_7 - funkcija potencijala brzine strujanja difrakcijskog vala.

Difrakcijski val osim pretpostavke potencijalnog strujanja, kinematičkog i dinamičkog rubnog uvjeta na slobodnoj površini, mora zadovoljiti i rubni uvjet nepromočivosti na oplakanoj površini tijela te uvjet radijacije u beskonačnosti. Amplituda vala zamire na dovoljnoj udaljenosti od tijela što znači da potencijal brzine strujanja difrakcijskog vala zadovoljava uvjet radijacije.

U drugom modelu tijelo prisilno oscilira sa 6 stupnjeva slobode na mirnoj vodi. Svih šest njihanja mogu se opisati funkcijom potencijala brzine strujanja valovima radijacije $\Phi_j(x, y, z; t)$, $j=1...6$. Valovi radijacije također moraju zadovoljiti uvjet u beskonačnosti te rubni uvjet nepromočivosti na oplakanoj površini.

Posljedica njihanja uslijed djelovanja hidrodinamičke uzbude su hidrostatičke i hidrodinamičke sile. Hidrostatičke sile su povratne sile koje vraćaju brod u ravnotežno stanje, a posljedica su pomaka tijela i djelovanja hidrostatičkog koeficijenta povratnog djelovanja. Hidrostatički koeficijenti neovisni su o brzini napredovanja broda te frekvencijama njihanja. Pretpostavka linearne teorije je da je veza između hidrostatičke sile i pomaka linearna, a samo promjena uzgona tijela uzrokuje povratne sile. Nelinearnost povratnih sila u stvarnosti najviše dolazi do izražaja prilikom ljuljanja broda [4].

Hidrodinamičke sile prigušuju oscilatorna gibanja tijela te se nazivaju i hidrodinamičkom reakcijom tijela. Kada su u fazi s ubrzanjem njihanja tada predstavljaju dodatnu masu, a kada su u fazi s brzinom predstavljaju prigušenje njihanja. Prigušenje ovisi o brzini njihanja tijela. U potencijalnoj teoriji strujanja prigušenje se smatra potencijalnim i odnosi se na odvođenje energije od broda valovima radijacije. Viskozno prigušenje može se zanemariti kod svih oblika njihanja osim ljuljanja [4].

Dinamička ravnoteža broda ostvarena je u svakom trenutku njihanja. Hidrodinamičke (i promjenjive hidrostatičke) sile i momenti uravnoteženi su inercijskim silama i momentima mase [1]. Jednadžba dinamičke ravnoteže glasi:

$$([M] + [A])\{\ddot{\eta}_j\} + [B]\{\dot{\eta}_j\} + [C]\{\eta_j\} = \zeta_a\{F_j(t)\} \quad (37)$$

gdje je:

$[M]$ - matrica mase tijela i momenata tromosti mase,

$[A]$ - matrica dodatne mase,

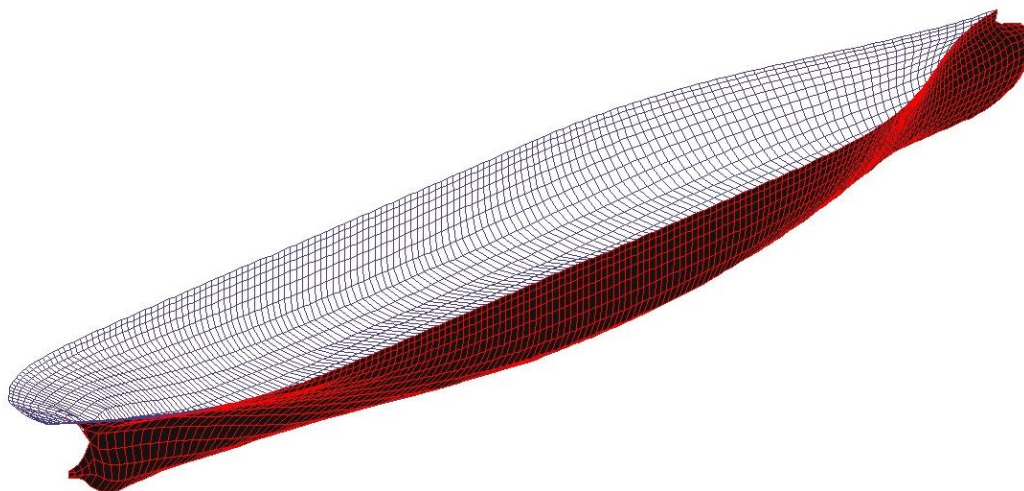
$[B]$ - matrica prigušenja,

$[C]$ - matrica povratnih sila,

ζ_a - jedinična amplituda nailaznog vala,

$F_j(t)$ - hidrodinamička uzbuda.

Program *HydroSTAR* temelji se na panelnoj metodi i potencijalnoj teoriji. Forma je definirana koordinatama rebara, gazom i trimom. Definiraju se masa istisnine, položaj težišta mase te radijusi tromosti mase oko težišta. Nakon unosa potrebnih podataka, program formira trup broda pomoću panela. Na slici 11. prikazani su paneli generirani do gaza broda.



Slika 11. Prikaz generirane mreže panela u programu *HydroSTAR* [15]

Panelna metoda rješava problem nelinearnosti slobodne površine. Kvadratni paneli generiraju se na oplati te iznad slobodne površine gdje se generiraju izvori i ponori. Kontrolne točke panela na oplati raspoređuju se u težištu panela dok se kontrolne točke panela iznad slobodne površine raspoređuju po slobodnoj površini.

Potencijal brzine panelne metode glasi [13]:

$$\phi(x, y, z) = \sum_{j=1}^{NB+NF} \rho_s \left(\int_{s_j} \frac{1}{r_{ij}} dS \right) + x \quad (38)$$

gdje je:

ρ_s - gustoća izvora/ponora,

r_{ij} - udaljenost slobodne površine od kontrolne točke,

NB - broj panela na oplati,

NF - broj panela iznad slobodne površine.

Paneli izvora i ponora moraju zadovoljiti uvjet kontinuiteta dan izrazom (27), a jakost izvora i ponora određuje se iz rubnih uvjeta danih izrazima (28), (29) i (30).

Uvjet slobodne površine linearizira se oko nekog poznatog referentnog rješenja te se iteracijom može doći do rješenja problema nelinearnosti slobodne površine. U svakoj slijedećoj iteraciji linearizacija se određuje u ovisnosti o prethodnoj, a prva iteracija provodi se na temelju početnog uvjeta koji može biti neporemećeno strujanje ili tijelo u mirovanju. Prema tome, prva iteracija razmatrati će linearizirane uvjete slobodne površine neporemećenog strujanja (bez valova) dok će svaka slijedeća iteracija pomicati linearizirane uvjete na valovitu slobodnu površinu određenu prethodnom iteracijom [13].

$$\nabla \phi = \nabla \phi_p + \nabla \phi' \quad \text{za } h_v = H_v + h_v' \quad (39)$$

gdje je:

ϕ_p - potencijal brzine referentnog, neporemećenog strujanja,

ϕ' - promijenjeni potencijal brzine strujanja,

H_v - pretpostavljena valna visina,

h_v' - promijenjena valna visina.

3.3. Viskozna teorija

Svi realni fluidi su viskozni. Ako je utjecaj viskoznosti na neku značajku dovoljno mali, takav se fluid može promatrati kao idealan, a u suprotnom se viskoznost ne bi trebala zanemariti [16]. Za razliku od potencijalne teorije koja opisuje strujanje idealnog fluida, teorija viskoznog strujanja (eng. *viscous flow*) ne zanemaruje viskoznost. Viskoznost fluida očituje se u gubitku energije uslijed zagrijavanja do kojeg dolazi djelovanjem sila trenja koje se

zanemaruju kod promatranja idealnog fluida. Viskoznost se stoga može promatrati kao mjera otpora fluida prema strujanju [17].

Ako fluid struji između dvije ploče od kojih je jedna nepomična, a druga se giba brzinom v_p , tada će se uslijed viskoznosti fluid u blizini ploče gibati jednakom brzinom kao ploča. U blizini mirujuće ploče, fluid će mirovati dok će se u blizini ploče koja se giba fluid gibati brzinom v_p . Profil brzina fluida između dvije ploče rast će linearno od 0 do v_p u slučaju laminarnog strujanja dok će u slučaju turbulentnog strujanja poprimati oblik parabole.

Uslijed nejednolike brzine strujanja javljaju se smična naprezanja τ koja se mogu izraziti kao [18]:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (40)$$

gdje je:

μ - dinamički koeficijent viskoznosti,

dv/dy - promjena brzine fluida po presjeku.

Kada je veza između tangencijalnih naprezanja i brzine fluida linearna, govori se o newtonovskom fluidu. Dinamički koeficijent viskoznosti newtonovskog fluida promjenjiv je s obzirom na temperaturu i tlak tako da se smanjuje s porastom temperature i padom tlaka.

Granični sloj je područje vrtložnog strujanja viskoznog fluida uz površinu tijela u kojem su viskozne i inercijske sile istog reda veličine. To je područje intenzivirane vrtložnosti, za razliku od potencijalnog strujanja, koje je bezvrtložno. Izvan graničnog sloja učinak viskoznosti je zbog malih poprečnih gradijenata brzine strujanja zanemarljiv pa se fluid u tom području može smatrati idealnim, a strujanje potencijalnim. Glavni cilj i rezultat teorije graničnog sloja jest mogućnost proračuna sile otpora gibanju tijela u viskoznom fluidu.

Debljina graničnog sloja definirana je kao udaljenost od stijenke u smjeru poprečne osi preko koje se brzina mijenja od 0 do 99% (99.5%) iznosa brzine vanjskog strujanja, to jest:

$$y = \delta \text{ za } v_x = 0,99v_\delta \quad (41)$$

gdje je:

v_δ - brzina potencijalnog strujanja,

v_x - brzina u nekoj točki graničnog sloja.

Pri rješavanju problema viskoznog strujanja potrebno je uzeti u obzir određene značajke realnog fluida. Kod realnih fluida čestice fluida koje su u kontaktu s površinom krutog tijela moraju biti u ravnoteži s tim tijelom pa će imati jednaku brzinu i temperaturu kao i tijelo s kojim su u dodiru, a na slobodnoj površini realne tekućine tlak fluida izjednačuje se s atmosferskim tlakom [18].

Poželjno je ograničiti analizu strujanja na konačno područje. To se može postići postavljanjem rubnih uvjeta na mjestu ulaza i izlaza fluida iz promatranog područja [18].

Problem viskoznog strujanja vrlo je kompleksan, a jednačbe koje ga opisuju komplicirane su i u nekim slučajevima nerješive zbog stalne promjene rubnih uvjeta u vremenu. Čak i sa računalnim programima vrlo ih je teško riješiti.

Zakon očuvanja mase odnosno jednačba kontinuiteta te zakon očuvanja količine gibanja dva su osnovna zakona dinamike fluida. Jednačba kontinuiteta govori da je brzina promjene mase materijalnog volumena jednaka nuli, a zakon očuvanja količine gibanja govori da je brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka sumi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen [19]. Sustav jednačbi sastoji se od četiri jednačbe od kojih su tri jednačbe očuvanja količine gibanja, a jedna jednačba kontinuiteta. Nepoznanice tih jednačbi su naprezanje i polje brzina gdje se tenzor naprezanja sastoji od šest komponenti, a polje brzina od tri pa je ukupan broj nepoznanica devet. Kako bi se riješile četiri jednačbe s devet nepoznanica potrebno je uvesti dodatne jednačbe pomoću kojih se povezuje kinematika i dinamika strujanja. Uvođenjem dodatnih jednačbi dobiva se sustav od deset jednačbi i deset nepoznanica što je moguće riješiti [19].

Općenito se rješavanje dinamike strujanja svodi na jednačbu kontinuiteta i Navier-Stokesove jednačbe, no kako bi ih bilo moguće riješiti potrebno je definirati odgovarajuće rubne uvjete. Kinematički rubni uvjet definira nepromočivost stjenke krutog tijela što znači da je brzina čestice uz stjenku jednaka brzini tijela te čestice fluida niti prodiru kroz stjenku krutog tijela niti se od nje odvajaju. Uvjet da fluid ne prodire kroz stjenku i ne odvajaju se od nje (eng. *no flux*) te uvjet tangencijalnog naprezanja (eng. *no slip*) mogu se zapisati kako slijedi [19]:

$$\vec{v}\vec{n} = u\vec{n} \quad (42)$$

$$\vec{v}\vec{t} = u\vec{t} \quad (43)$$

gdje je:

v - brzina strujanja fluida,

u - brzina tijela,

\vec{n} - vektor normale na stjenku krutog tijela,

\vec{t} - tangencijalni vektor na stjenku krutog tijela.

Dinamičkim rubnim uvjetom definira se kontinuiranost naprežanja fluida na slobodnoj površini te vrijede jednačbe [19]:

$$p_1 = p_2 + p_G \quad (44)$$

$$\sigma_{ij1} = \sigma_{ij2} + \sigma_{ijG} \quad (45)$$

gdje je:

p_1, σ_{ij1} - tlak i naprežanje prvog fluida,

p_2, σ_{ij2} - tlak i naprežanje drugog fluida,

p_G, σ_{ijG} - tlak i naprežanje na granici fluida.

3.3.1. Navier-Stokesove jednačbe

Navier-Stokesove jednačbe smatraju se najtočnijim načinom rješavanja problema strujanja. Osnova Navier-Stokes-ovih jednačbi je drugi Newtonov zakon koji definira silu kao umnožak mase i ubrzanja [20]:

$$F = ma \quad (46)$$

gdje je:

F - sila,

m - masa,

a - ubrzanje.

Kada se sila svede na jedinični volumen može se zapisati:

$$\rho \cdot \left(\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = f_u \quad (47)$$

gdje promjena brzine fluida ne ovisi samo o vremenu nego i o promjeni položaja čestice.

Ukupna sila je zbroj viskozne sile, sile tlaka i masene sile pa slijedi [21]:

$$f_u = f_v + f_p + f = \mu \nabla^2 \vec{v} + (-\nabla p) + f \quad (48)$$

Kada se izraz (48) uvrsti u izraz (46) te se sve podijeli s gustoćom fluida, dobije se opći oblik Navier-Stokesove jednačbe [21]:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \nu \nabla^2 \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{f}{\rho} \quad (49)$$

Desna strana jednadžbe označava ukupnu silu koja sadrži silu tlaka $-\nabla p$, viskoznu silu $\mu \nabla^2 \vec{v}$ i masenu silu f koje djeluju na fluid, ν predstavlja kinematički koeficijent viskoznosti, a dobiva se dijeljenjem dinamičkog koeficijenta viskoznosti s gustoćom fluida [21].

Opći oblik Navier-Stokesovih jednadžbi u kombinaciji s jednadžbom kontinuiteta tvori četiri jednadžbe s četiri nepoznanice koje je vrlo teško riješiti zbog njihove nelinearnosti.

Za što jednostavnije rješavanje tih jednadžbi parametri se svode na bezdimenzijski oblik [21]:

$$x' = \frac{x}{L_0} ; y' = \frac{y}{L_0} ; z' = \frac{z}{L_0} \quad (50)$$

$$v' = \frac{v}{v_0} \quad (51)$$

$$p' = \frac{p}{\rho v_0^2} \quad (52)$$

$$\nabla' = \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial}{\partial y'} + \frac{\partial}{\partial z'} = L_0 \nabla \quad (53)$$

$$t' = t \frac{v_0}{L_0} \quad (54)$$

gdje je:

L_0 - karakteristična duljina tijela,

v_0 - karakteristična brzina tijela,

p - tlak fluida,

t - vrijeme.

Vrijednosti označene apostrofom predstavljaju bezdimenzijski oblik odgovarajućih parametara.

Ako se zanemari utjecaj masene sile te se bezdimenzijski parametri uvrste u izraz (49) može se zapisati jednadžba koja vrijedi za nestlačivi fluid bez rotacije [21]:

$$\frac{d(v'v_0)}{dt' \frac{L_0}{v_0}} + (v'v_0) \cdot \frac{\nabla'}{L_0} (v'v_0) = \nu \left(\frac{\nabla'}{L_0} \right)^2 (v'v_0) - \frac{1}{\rho} \frac{\nabla'}{L_0} p' \rho v_0^2 \quad (55)$$

Uzevši u obzir da su karakteristična duljina i brzina tijela te gustoća fluida konstantne vrijednosti, ako se izraz (55) podijeli s izrazom L_0/v_0 slijedi:

$$\frac{dv'}{dt'} + v' \cdot \nabla' v' = \frac{\nu}{\nu_0 L_0} \nabla'^2 v' - \nabla' p' \quad (56)$$

gdje izraz $\nu/\nu_0 L_0$ predstavlja Reynoldsov broj. Ovakav oblik Navier-Stokesove jednadžbe je bezdimenzijski oblik. Za relativno male Reynoldsove brojeve inercijska komponenta $v' \cdot \nabla' v'$ bit će znatno manja od viskozne te se može zanemariti. U tom će slučaju viskoznost fluida imat će utjecaj i na velikim udaljenostima od uronjenog tijela. Za vrlo male tlakove i male Reynoldsove brojeve, Navier-Stokesove jednadžbe postaju difuzijske jednadžbe [21]:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \nu \nabla^2 \vec{v} \quad (57)$$

Kod velikih Reynoldsovih brojeva javlja se turbulentno strujanje, a iz izraza (56) se može vidjeti da će utjecaj viskozne komponente u turbulentnom strujanju biti veoma mali te će se u tom slučaju komponenta viskozne sile zanemariti. Tada Navier-Stokesove jednadžbe postaju Eulerove jednadžbe neviskoznog strujanja:

$$\frac{dv}{dt} + v \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (58)$$

3.3.2. *Bezdimenzijski parametri viskoznog strujanja*

Zbog kompliciranosti problema viskoznog strujanja potrebno je uvesti neke bezdimenzijske parametre kako bi se omogućila što učinkovitija i korisnija formulacija danih izraza. Bezdimenzijski oblik moguće je odrediti dijeljenjem cijele jednadžbe određenom konstantom koju ta jednadžba sadrži. Izrazi dobiveni na takav način sadrže bezdimenzijske veličine od kojih su najznačajnije [20]:

1. Froudeov broj označava odnos inercijske i gravitacijske sile.

$$Fn = \frac{v_0}{\sqrt{gL_0}} \quad (59)$$

2. Eulerov odnosno kavitacijski broj vrijedi ako postoji razlika u tlakovima kod strujanja.

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho_\infty v_\infty^2} \quad (60)$$

3. Reynoldsov broj označava omjer inercijskih i viskoznih sila te služi kao kriterij prelaska iz laminarnog u turbulentno strujanje. Laminarno strujanje odvija se u područjima manjih vrijednosti Reynoldsovog broja gdje je veći utjecaj viskoznosti.

$$Rn = \frac{vL_0}{v_0} \quad (61)$$

1. Strouhalov broj vrijedi u slučaju nestacionarnog strujanja.

$$St = \frac{\omega_s L_0}{v_\infty} \quad (62)$$

gdje je:

ρ_∞ , v_∞ - gustoća i brzina fluida na mjestu neporemećenog strujanja,

ω_s - frekvencija uronjenog tijela oko kojeg struji fluid.

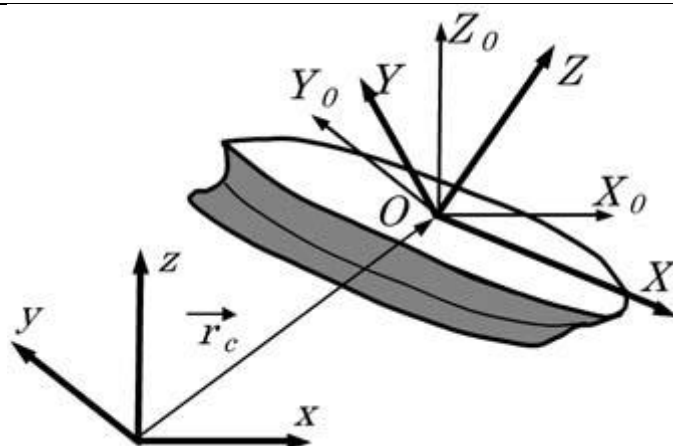
S navedena četiri parametra dani su kriteriji sličnosti Navier-Stokesovih jednadžbi čime se omogućilo njihovo jednostavnije rješavanje.

3.3.3. *Princip rada programskog paketa WISDAM-X*

Metoda programskog paketa *WISDAM-X* (eng. *Wave Viscous Flow Difference Accurate Method*) razvijena je kako bi se odredila njihanja broda te dodatni otpor broda na nemirnom moru. Temelji se na teoriji viskoznog strujanja te koristi bezdimenzijske RANS jednadžbe (eng. *Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*) i jednadžbe kontinuiteta za određivanje odziva broda na valovima koje se rješavaju pomoću preklapajućeg sustava mreža koristeći metodu konačnih volumena [22].

WISDAM-X koristi tri različita koordinatna sustava prokazana na slici 12.

- koordinatni sustav nepomičan u prostoru, $Oxyz$, gdje ravnina xy definira slobodnu površinu mirne vode, a os z gleda prema gore.
- koordinatni sustav broda, $OXYZ$ kojemu se ishodište nalazi u težištu masa, os X orijentirana je prema krmi, os Y prema desnoj strani broda, a os Z prema gore
- translacijski koordinatni sustav, $O_0X_0Y_0Z_0$ orijentiran je jednako kao i nepomični koordinatni sustav, a ishodište mu je u težištu masa.



Slika 12. Prikaz koordinatnih sustava korištenih u programu WISDAM-X [22]

Odnos između koordinatnih sustava može se izraziti pomoću Eulerovih kutova $\Omega = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ te se može prikazati slijedećim izrazima [22]:

$$\{X_0, Y_0, Z_0\} = \{x, y, z\} - r_c(t) \quad (63)$$

$$\{X, Y, Z\} = [E] \{X_0, Y_0, Z_0\} \quad (64)$$

gdje je:

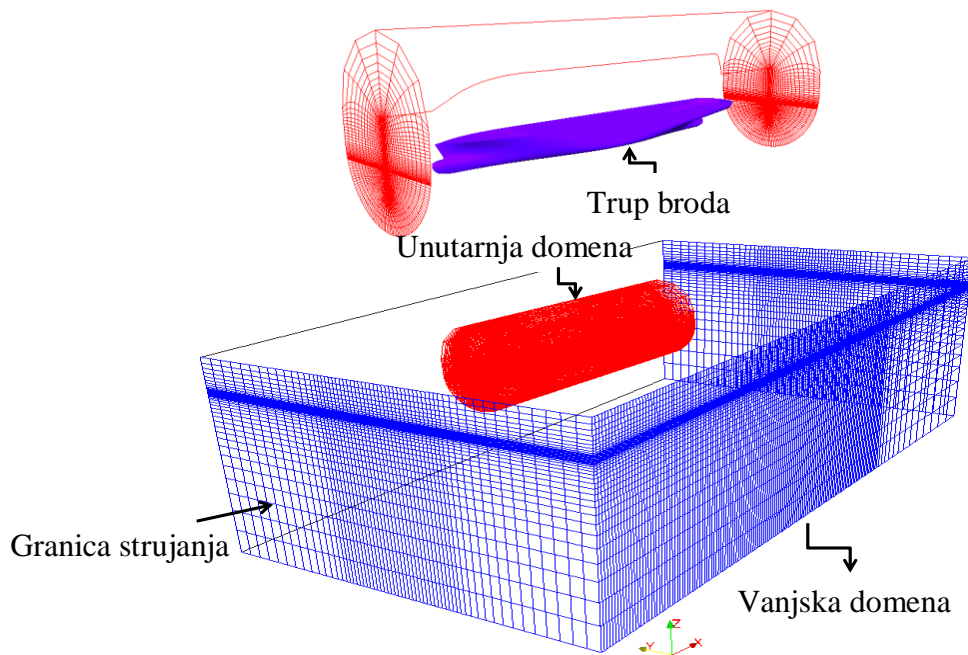
$[E]$ - matrica Eulerovih kutova,

r_c - vektor težišta masa.

Preklapajući sustav mreže konačnih volumena omogućuje simulaciju interakcije broda i valova te rezultirajućeg njihanje broda. Promatrana domena podijeljena je u dvije preklapajuće pod-domene gdje je unutarnja domena generirana u blizini trupa dok je vanjska za nekoliko duljina broda udaljena od trupa. Pri određivanju njihanja broda unutarnja domena se pomiče u skladu s njihovim pri čemu se određuju točke preklapanja domena uslijed pomicanja. Nakon pomicanja unutarnje domene, interpoliraju se značajke strujanja u području preklapanja, proračunavaju se strujanja u unutarnjoj domeni nakon pomaka, interpoliraju se brzina strujanja, tlak i gustoća unutarnje domene na području preklapanja s vanjskom domenom te se proračunavaju strujanja u vanjskoj domeni. Kako bi se spriječilo zalijevanje palube (eng. *green sea*) program generira dodatni dio broda iznad projektne visine broda.

Unutarnja domena nalazi se u blizini slobodne površine te se generira gušća mreža nego u vanjskoj domeni.

Na slici 13. prikazan je primjer generiranih domena u programskom paketu WISDAM-X. [22]



Slika 13. Prikaz domene simulacije u programu WISDAM-X

RANS jednadžbe i jednadžbe kontinuiteta izražene su u integralnom obliku:

$$\int_{V_K} \frac{\partial v}{\partial t} dV + \int_{\partial V_K} \sigma dS = \int_{V_K} f dV \quad (65)$$

gdje je:

V_K - kontrolni volumen,

v - brzina strujanja fluida,

σ - tenzor naprezanja.

Sve značajke fluida bezdimenzijskog su oblika kao što je prikazano izrazima (50), (51), (52), (53) i (54) [22].

Tenzor naprezanja prikazan je izrazom:

$$\sigma = vv + p_p I - \left(\frac{1}{Rn} + \nu \right) \left[\nabla v + \{ \nabla v \} \right] \quad (66)$$

gdje je:

p_p - piezometrički tlak,

ν - kinematički koeficijent viskoznosti,

I - jedinični tenzor,

Rn - Reynoldsov broj.

$$p_p = p_s + \frac{z}{Fn^2} \quad (67)$$

gdje je:

p_s - statički tlak,

z - visina slobodne površine u odnosu na mirnu vodnu liniju,

Fn - Froudeov broj.

Vektor masene sile dan je izrazom:

$$f = -2\omega_k \times v - \omega_k \times (\omega_k \times r) - \frac{d\omega_k}{dt} \times r - \frac{dv_T}{dt} \quad (68)$$

gdje je:

ω_k - kutna brzina strujanja oko brodskog koordinatnog sustava,

r - vektor položaja u brodskom koordinatnom sustavu,

v_T - vektor translacije brzine strujanja. [22]

Kako bi se dobili zadovoljavajući rezultati potrebno je definirati vodonepropusnost oplata, jednolikost strujanja unutar domene te simetriju oko uzdužne XZ ravnine broda. Na slobodnoj površini potrebno je zadovoljiti kinematički i dinamički uvjet.

Prema kinematičkom uvjetu brzina čestice fluida u smjeru normale na slobodnu površinu jednaka je nuli te se određuje metodom funkcije gustoće DFM (eng. *Density-Function Method*). DFM je metoda koja rješava jednadžbu skalarne varijable ρ_m [23]:

$$\int_{V_k} \frac{\partial \rho_m}{\partial t} dV = - \int_{\partial V_k} \rho_m v \cdot dS \quad (69)$$

gdje ρ_m predstavlja funkciju gustoće.

Funkcija gustoće definirana je tako da je:

$$\rho_m = \begin{cases} 1, & \text{u području fluida} \\ 0, & \text{izvan područja fluida} \end{cases} \quad (70)$$

Na slobodnoj površini funkcija gustoće poprimit će vrijednost 0,5.

Dinamički uvjet definira da je tlak na slobodnoj površini jednak nuli [13]. Za rješavanje dinamičkog uvjeta zanemaruje se napetost slobodne površine te se uvjet brzine strujanja i tlaka na slobodnoj površini prikazuje slijedećim izrazom:

$$\frac{\partial v}{\partial n} = 0 \quad (71)$$

$$p_p = \frac{z}{Fn^2} \quad (72)$$

Nailazni valovi definirani su linearnom teorijom valova, a generiraju se u vanjskoj domeni [22].

Njihanja broda određena su slijedećim jednažbama:

$$m \left(\frac{d^*}{dt} v_r + \omega \times v_r \right) = F \quad (73)$$

$$\frac{d^*}{dt} (I_0 \omega) + \omega \times (I_0 \omega) = M \quad (74)$$

gdje je:

m - masa broda,

d^*/dt - diferencijal vremena u neinercijskom brodskom koordinatnom sustavu,

I_0 - moment inercije broda,

F - hidrodinamička sila,

M - hidrodinamički moment.

Hidrodinamička sila i moment određeni su integracijom naprezanja po oplakanoj površini.

4. ANALIZA REZULTATA PONIRANJA I POSRTANJA U VREMENSKOJ DOMENI

4.1. Definiranje ulaznih podataka

Kako bi se proveli proračuni u odgovarajućim programskim paketima, potrebno je generirati geometriju broda. U ovom su radu analizirane amplitude njihanja kontejnerskog broda KCS (eng. *KRISO Container Ship*). KCS je razvijen kao prototip za vrednovanje hidrodinamičkih značajki modernih kontejnerskih brodova s pramčanim bulbom. Glavne dimenzije broda i modela dani su u tablici 1., [24]:gdje je:

L_{PP} - duljina između okomica,

L_{WL} - duljina na vodnoj liniji,

B_{MAX} - maksimalna širina,

D - visina,

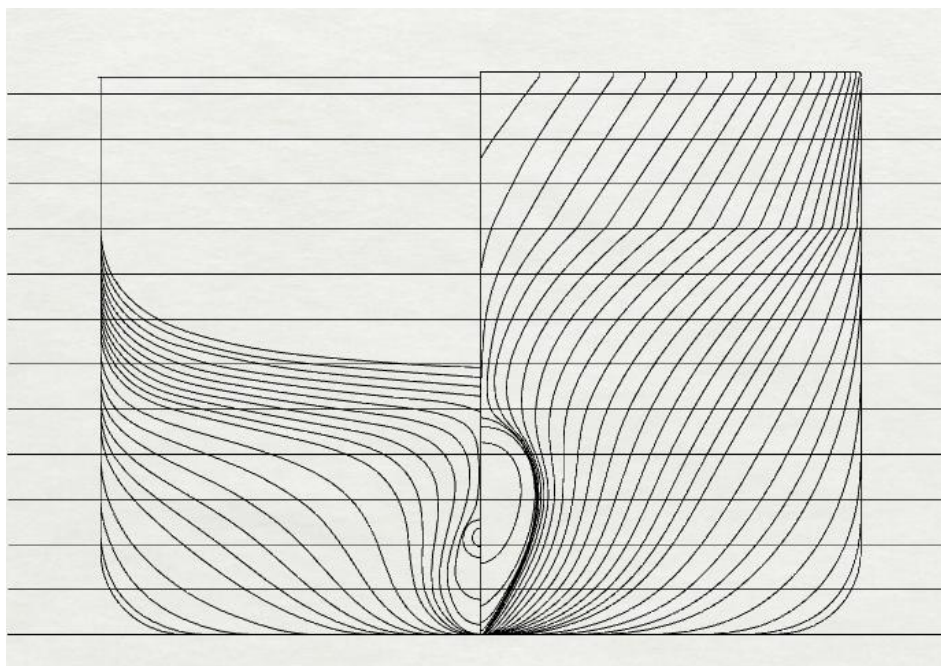
T - gaz,

∇ - volumen istisnine.

Tablica 1. Podaci o geometriji broda u naravi i modela

	Brod u naravi	Model 1	Model 2
L_{PP} , [m]	230,0	4,3671	6,07
L_{WL} , [m]	232,5	4,4141	6,1357
B_{MAX} , [m]	32,2	0,6114	0,8498
D , [m]	19,0	0,45	0,5015
T , [m]	10,8	0,2051	0,258
∇ , [m ³]	52030	0,3562	0,9571

Kako bi bilo moguće usporediti rezultate njihanja dobivene programskim paketima *WISDAM-X* i *HydroSTAR* potrebno je definirati jednake uvjete simulacije, odnosno jednake ulazne parametre. Ulazni podaci definirani su prema rezultatima eksperimentalnog ispitivanja modela na Korejskom brodarskom institutu KRISO (eng. *Korea Research Institute for Ships and Ocean Engineering*) te su ti podaci dani u tablici 2. [24]. Nacrt rebara dan je na slici 14.



Slika 14. Prikaz nacrtu rebara kontejnerskog broda KCS

Tablica 2. Ulazni podaci za programski paket WISDAM-X

Fn	λ/L_{PP}	ζ/L_{PP}
0,260	1,150	0,0100
	2,000	0,0167
0,330	1,330	0,0112
0,26	1,1497	0,0203

U programskom paketu *WISDAM-X* potrebno je unositi bezdimenzijske podatke o valnoj duljini λ/L_{PP} , amplitudi vala ζ/L_{PP} i Froudeovom broju Fn kako je priloženo u tablici 2. te je potrebno definirati trenutke za koje će se odrediti amplitude njihanja. Obzirom da su ulazni podaci programskog paketa *WISDAM-X* svedeni na jediničnu duljinu, rezultati simulacije vrijede i za brod u naravi i za modele uz uvjet jednake gustoće fluida u kojem se nalaze te jednaki sustav valova.

Kako bi se unijeli odgovarajući ulazni podaci u programski paket *HydroSTAR* potrebno je podatke iz tablice 2. preračunati u dimenzijski oblik. Valnu duljinu i valnu amplitudu u metrima moguće je dobiti kada se dani podaci pomnože sa odgovarajućom duljinom:

$$\lambda = \frac{\lambda}{L_{PP}} L_{PP} \quad (75)$$

$$\zeta = \frac{\zeta}{L_{PP}} L_{PP} \quad (76)$$

gdje je:

λ - valna duljina,

ζ - valna amplituda.

Za simulaciju odziva u programskom paketu *HydroSTAR* potrebno je unijeti podatke o brzini broda ili modela te je potrebno odrediti frekvenciju vala. Brzina broda može se izraziti pomoću Froudeovog broja:

$$u = Fn \sqrt{gL_{PP}} \quad (77)$$

gdje je:

Fn - Froudeov broj,

u - brzina broda,

g - ubrzanje Zemljine sile teže.

Frekvenciju vala moguće je odrediti prema disperzivnoj jednadžbi (32) uzevši u obzir uvjet duboke vode, odnosno $d \rightarrow \infty$. Za duboku vodu vrijedi [1]:

$$\text{th}(kd) = 1 \quad (78)$$

$$\omega^2 = kg \rightarrow \omega = \sqrt{kg} \quad (79)$$

gdje je:

d - dubina vode,

k - valni broj,

ω - valna frekvencija.

Tablica 3. Ulazni podaci modela za programski paket *HydroSTAR*

	Model 1				Model 2			
Fn	λ [m]	ζ [m]	ω [s ⁻¹]	u [m/s]	λ [m]	ζ [m]	ω [s ⁻¹]	u [m/s]
0,26	5,02	0,04	3,5027	1,7018	6,98	0,06	2,9710	2,0064
	8,73	0,07	2,6561	1,7018	12,14	0,10	2,2529	2,0064
0,33	5,81	0,05	3,2571	2,1600	8,07	0,07	2,7626	2,5465
0,26	5,02	0,09	3,5032	1,7083	6,979	0,123	2,9714	2,0141

U tablici 3. dani su podaci o valnim duljinama, amplitudama i frekvencijama za oba modela pri odgovarajućim Froudeovim brojevima, odnosno brzinama plovidbe. Za brod u naravi odredit će se raspon frekvencija na Froudeovom broju $Fn = 0,26$ koji odgovara projektnoj brzini plovidbe $u = 24$ čv.

U oba će se programska paketa vršiti analize poniranja i posrtanja za model 1 na Froudeovim brojevima 0,26 i 0,33, a za model 2 analizirat će se poniranje i posrtanje na Froudeovom broju 0,26. Njihanja oba modela bit će funkcija vremena.

Analiza poniranja i posrtanja provest će se u programskom paketu *HydroSTAR* za model 1, model 2 i brod u naravi u odgovarajućem rasponu valnih frekvencija, a njihanja će biti prikazana u frekvencijskoj domeni.

Kut nailaska valova, odnosno kursni kut β u oba programska paketa iznosi 180° što označava valove u pramac (eng. *head wave*).

U tablici 4. dana su četiri slučaja za koja je provedena simulacija u dva programska paketa. Tri slučaja provedena su za Froudeov broj koji odgovara projektnoj brzini broda dok je jedan slučaj proveden za Froudeov broj koji odgovara brzini većoj od projektne.

Tablica 4. Podaci za provedene simulacije

	Fn	λ/L_{PP}	ζ/L_{PP}	λ [m]	ζ [m]	k [m ⁻¹]	ω [s ⁻¹]	u [m/s]
M1-1	0,260	1,1500	0,0100	5,02	0,04	1,2511	3,5027	1,7018
M1-2		2,0000	0,0167	8,73	0,07	0,7194	2,6561	1,7018
M1-3	0,330	1,3300	0,0112	5,81	0,05	1,0818	3,2571	2,1600
M2	0,26	1,1497	0,0203	6,979	0,123	0,9003	2,9714	2,0141

Model 1 korišten je u analizi slučajeva M1, a u analizi slučaja M2 korišten je model 2.

Dodatni parametri korišteni u proračunu su:

$\beta = 180^\circ$ -kut nailaska valova odnosno kursni kut,

$\rho_{sv} = 999,1 \text{ kg/m}^3$ -gustoća slatke vode,

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ -ubrzanje Zemljine sile teže.

Unutarnja domena u programskom paketu *WISDAM-X* generirana je s 191100 kontrolnih volumena (130 x 21 x 139), a vanjska domena generirana je s 185566 kontrolnih volumena (146 x 31 x 41). Obzirom da se unutarnja domena nalazi u neposrednoj blizini trupa broda, s

većim brojem kontrolnih volumena generira se vrlo fina mreža. Vanjska domena zauzima mnogo veći ukupni volumen pa će imati dosta grublju mrežu kontrolnih volumena.

U programskom paketu *HydroSTAR* generirala se mreža od 4500 panela odnosno 150 panela po duljini broda i 30 panela po poprečnom presjeku.

4.2. Analiza rezultata dobivenih programskim paketom *WISDAM-X*

Vrijednosti amplitude njihanja dobivene programskim paketom *WISDAM-X* su u bezdimenzijskom obliku, svedene na jediničnu duljinu broda odnosno modela te je dobivene vrijednosti potrebno pomnožiti s odgovarajućom duljinom:

$$\eta_a = \eta'_a L_{PP} \quad (80)$$

gdje je:

η_a - amplituda njihanja,

η'_a - amplituda njihanja u bezdimenzijskom obliku.

Trenutci određivanja amplitude njihanja također su u bezdimenzijskom obliku te ih je potrebno izraziti u sekundama:

$$t = t' \frac{L_{PP}}{u} \quad (81)$$

gdje je:

t - vrijeme,

t' - vrijeme u bezdimenzijskom obliku.

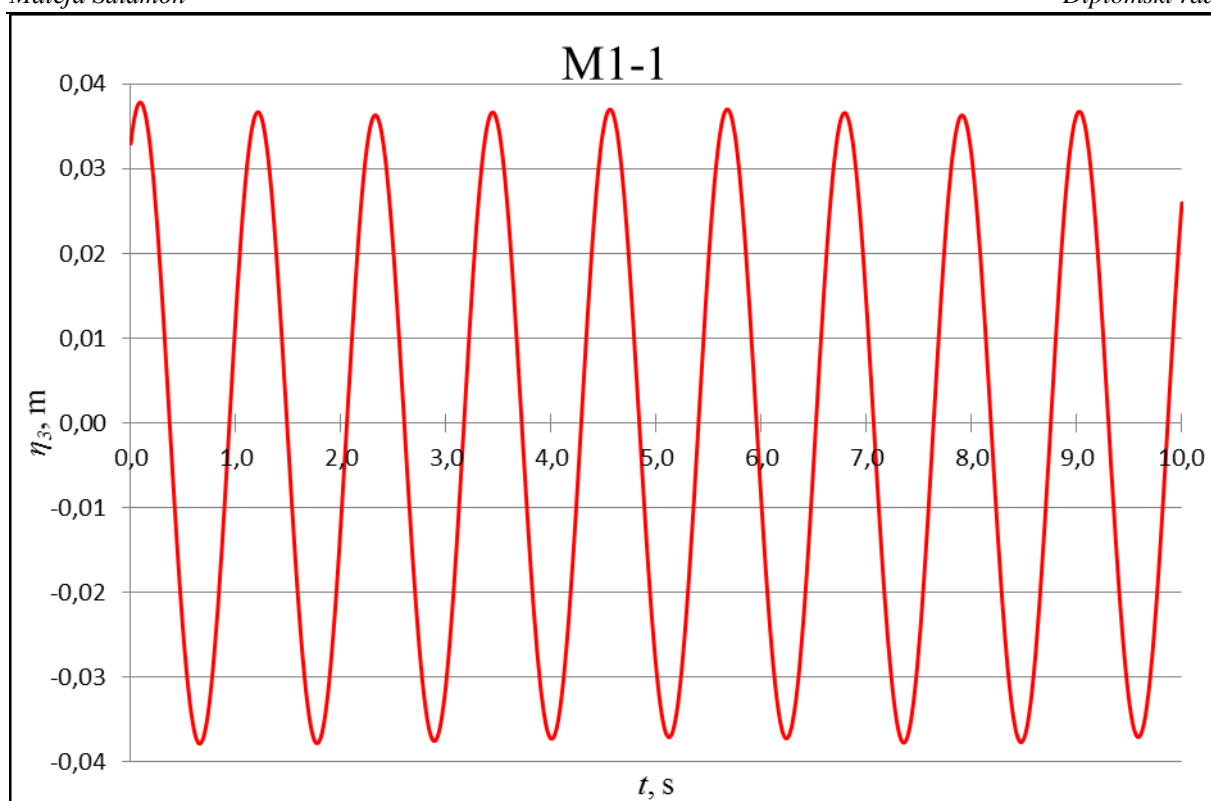
Za amplitude odziva dobivene programskim paketom *WISDAM-X* koristit će se indeks W .

4.2.1. Amplitude poniranja

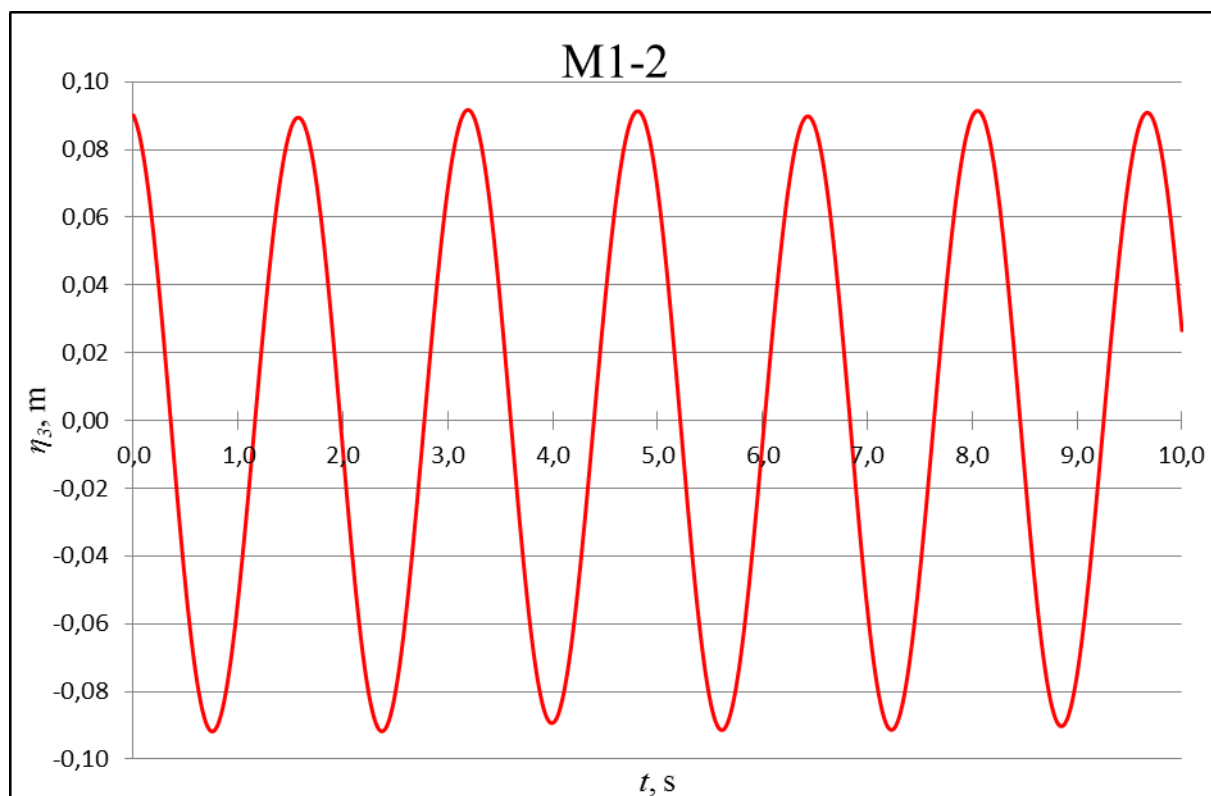
U tablici 5. te na slikama 15. - 18. prikazane su amplitude odziva u vremenskoj domeni za model 1 i model 2 pri plovidbi na Froudeovom broju $Fn = 0,26$ za slučajeve M1-1, M1-2 i M2 te $Fn = 0,33$ za slučaj M1-3.

Tablica 5. Vrijednosti amplituda poniranja u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom WISDAM-X

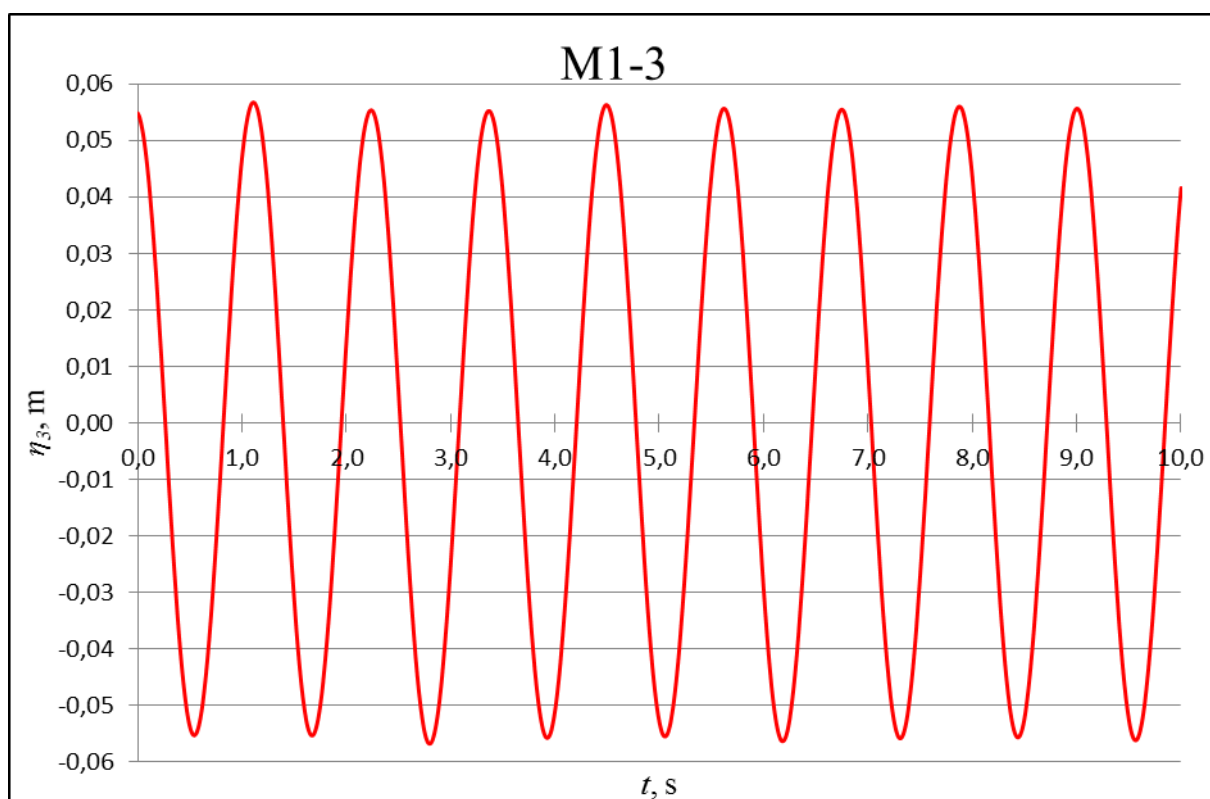
Vrijeme, t [s]	Poniranje, η_{3W} [m]			
	M1-1	M1-2	M1-3	M2
0,0	0,03297	0,09019	0,05487	-0,08709
0,3	0,01361	0,01844	-0,01250	-0,06120
0,6	-0,03563	-0,07430	-0,05135	0,06933
0,9	-0,00845	-0,07721	0,02301	0,07939
1,2	0,03666	0,01471	0,04949	-0,04939
1,5	-0,00123	0,08533	-0,03318	-0,10611
1,8	-0,03745	0,05775	-0,04216	0,01343
2,1	0,00951	-0,04447	0,04054	0,09884
2,4	0,03265	-0,09084	0,03280	0,00387
2,7	-0,01838	-0,02739	-0,04749	-0,10629
3,0	-0,03057	0,06898	-0,02504	-0,04681
3,3	0,02576	0,08326	0,05203	0,08670
3,6	0,02132	-0,00393	0,01193	0,04885
3,9	-0,03115	-0,08344	-0,05505	-0,08130
4,2	-0,01656	-0,05955	-0,00141	-0,08701
4,5	0,03549	0,03886	0,05614	0,04619
4,8	0,00820	0,09128	-0,00611	0,09280
5,1	-0,03687	0,03933	-0,05358	-0,03839
5,4	0,00125	-0,06297	0,02087	-0,10898
5,7	0,03676	-0,08647	0,05109	-0,00830
6,0	-0,00973	-0,00611	-0,03317	0,09880
6,3	-0,03459	0,07970	-0,04383	0,01578
6,6	0,01550	0,07274	0,03951	-0,10422
6,9	0,02986	-0,02333	0,03777	-0,05501
7,2	-0,02576	-0,09090	-0,04595	0,07781
7,5	-0,02466	-0,04215	-0,02522	0,06274
7,8	0,02929	0,05300	0,05060	-0,06963
8,1	0,01601	0,08973	0,01825	-0,09680
8,4	-0,03554	0,01766	-0,05471	0,03741
8,7	-0,01148	-0,07386	-0,00310	0,09566
9,0	0,03645	-0,07468	0,05563	-0,02838
9,3	-0,00109	0,01811	-0,00542	-0,11031
9,6	-0,03698	0,08735	-0,05456	-0,02022
9,9	0,00741	0,05755	0,01485	0,09648
10,0	0,02597	0,02660	0,04161	0,09776



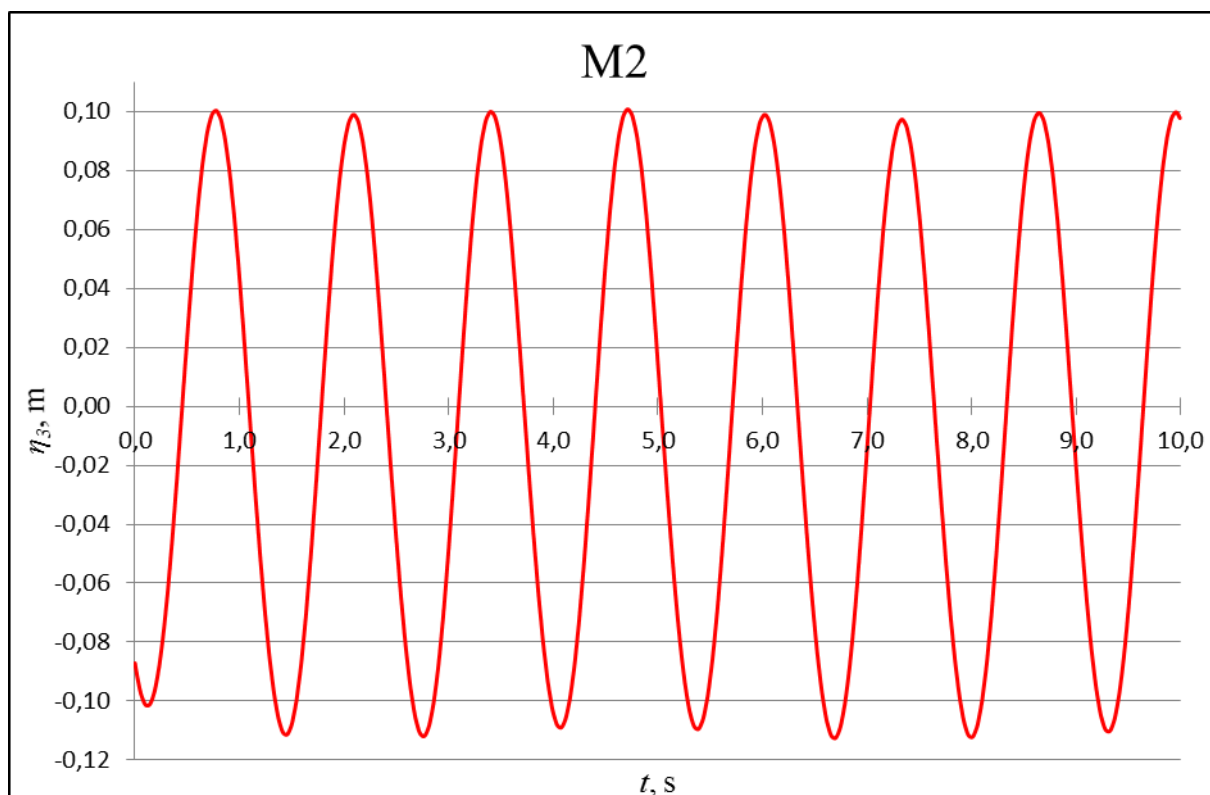
Slika 15. Amplitude poniranja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom WISDAM-X



Slika 16. Amplitude poniranja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom WISDAM-X



Slika 17. Amplitude poniranja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom WISDAM-X



Slika 18. Amplitude poniranja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom WISDAM-X

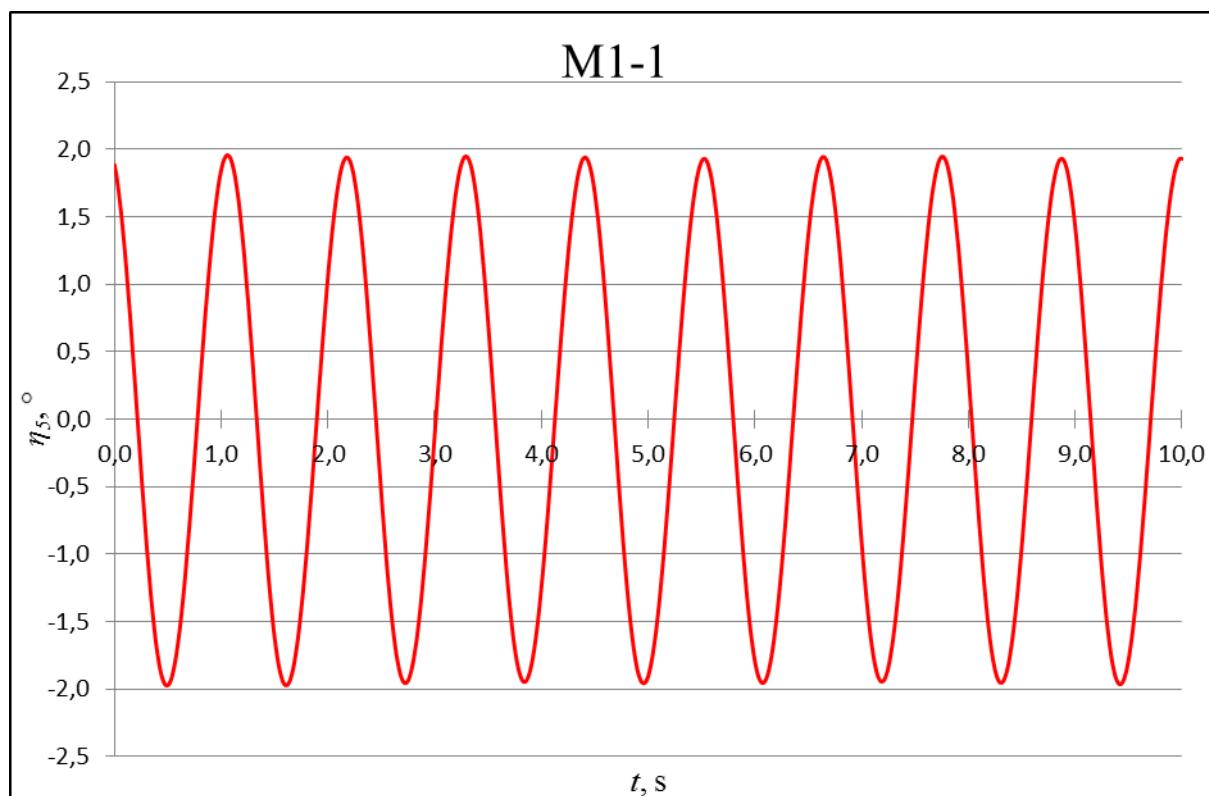
4.2.2. Amplitude posrtanja

U tablici 6. te na slikama 19. - 22. prikazane su amplitude odziva u vremenskoj domeni za model 1 i model 2 pri plovidbi na Froudeovom broju $Fn = 0,26$ za slučajeve M1-1, M1-2 i M2 te $Fn = 0,33$ za slučaj M1-3.

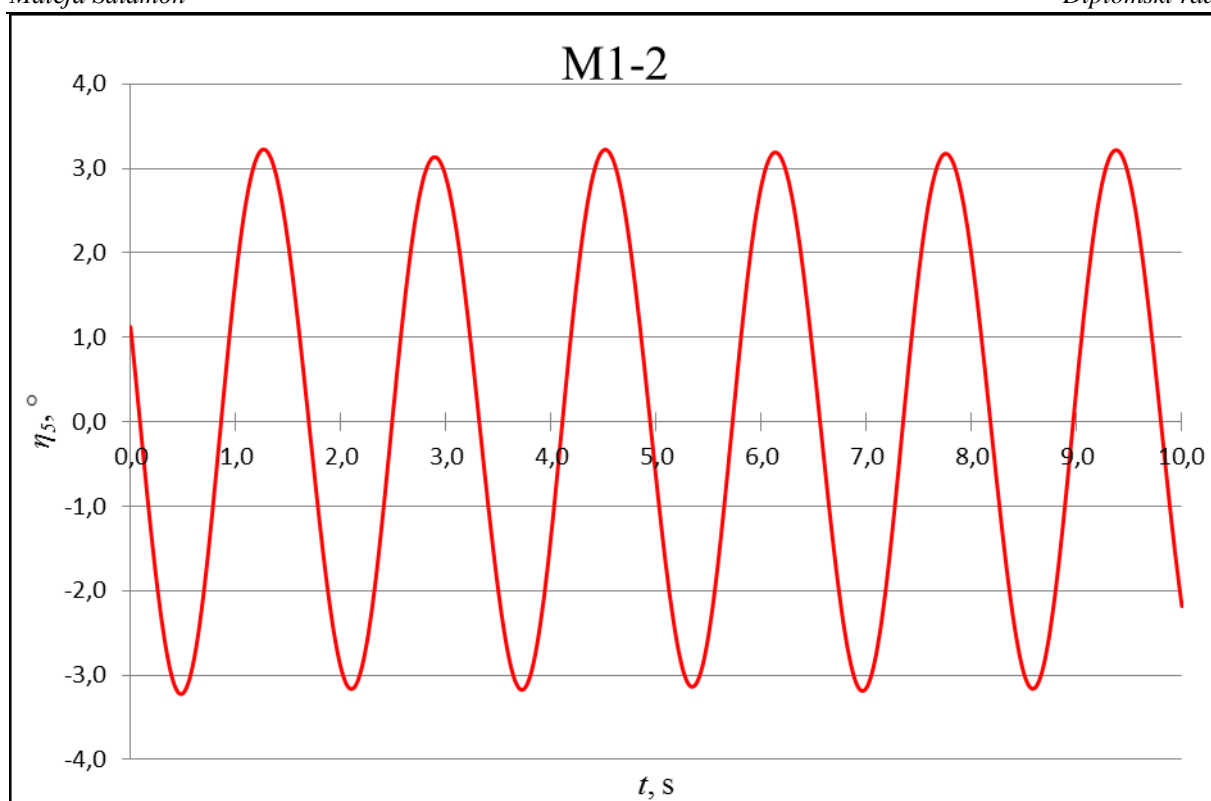
Tablica 6. Vrijednosti amplituda posrtanja u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom WISDAM-X

Vrijeme, t [s]	Posrtanje, η_{sw} [°]			
	M1-1	M1-2	M1-3	M2
0,0	1,88669	1,12542	0,99273	-3,39974
0,3	-0,96683	-2,42768	-2,27641	1,04122
0,6	-1,66813	-2,87703	-0,42803	3,58951
0,9	1,21372	0,48175	2,34713	0,12315
1,2	1,31761	3,13700	0,09906	-3,49079
1,5	-1,56544	2,17965	-2,33995	-0,97457
1,8	-1,01100	-1,17712	0,39909	3,21406
2,1	1,76777	-3,16582	2,31557	2,08501
2,4	0,46989	-1,02070	-0,85339	-2,68857
2,7	-1,93048	2,29037	-2,15253	-2,82921
3,0	-0,10731	2,89185	1,28349	1,80003
3,3	1,94286	0,13446	1,81907	3,14012
3,6	-0,49017	-2,85846	-1,71749	-1,41827
3,9	-1,84705	-2,38334	-1,56230	-3,37358
4,2	0,80523	1,19867	1,97718	0,21276
4,5	1,62241	3,22172	1,08676	3,44177
4,8	-1,21214	1,63430	-2,13573	0,89521
5,1	-1,36351	-1,80541	-0,65322	-3,32097
5,4	1,52300	-3,02891	2,36147	-1,56888
5,7	1,05577	-0,37894	0,36439	2,77776
6,0	-1,80138	2,80346	-2,36849	2,25093
6,3	-0,55801	2,56138	0,32113	-2,30025
6,6	1,87810	-0,43673	2,29274	-2,81036
6,9	0,16232	-3,08696	-0,64869	1,67793
7,2	-1,93862	-1,75686	-2,19159	3,30179
7,5	0,37317	1,89006	1,24143	-0,71689
7,8	1,89262	3,13327	1,98617	-3,48817
8,1	-0,79234	0,88139	-1,49567	-0,22382
8,4	-1,65044	-2,42586	-1,57528	3,33641
8,7	1,06382	-2,81870	1,96671	1,21351
9,0	1,41538	0,45740	1,32268	-3,23743
9,3	-1,57241	3,11587	-2,11237	-1,75472
9,6	-1,13157	2,20365	-0,72029	2,56531
9,9	1,69388	-1,17345	2,28290	2,79221

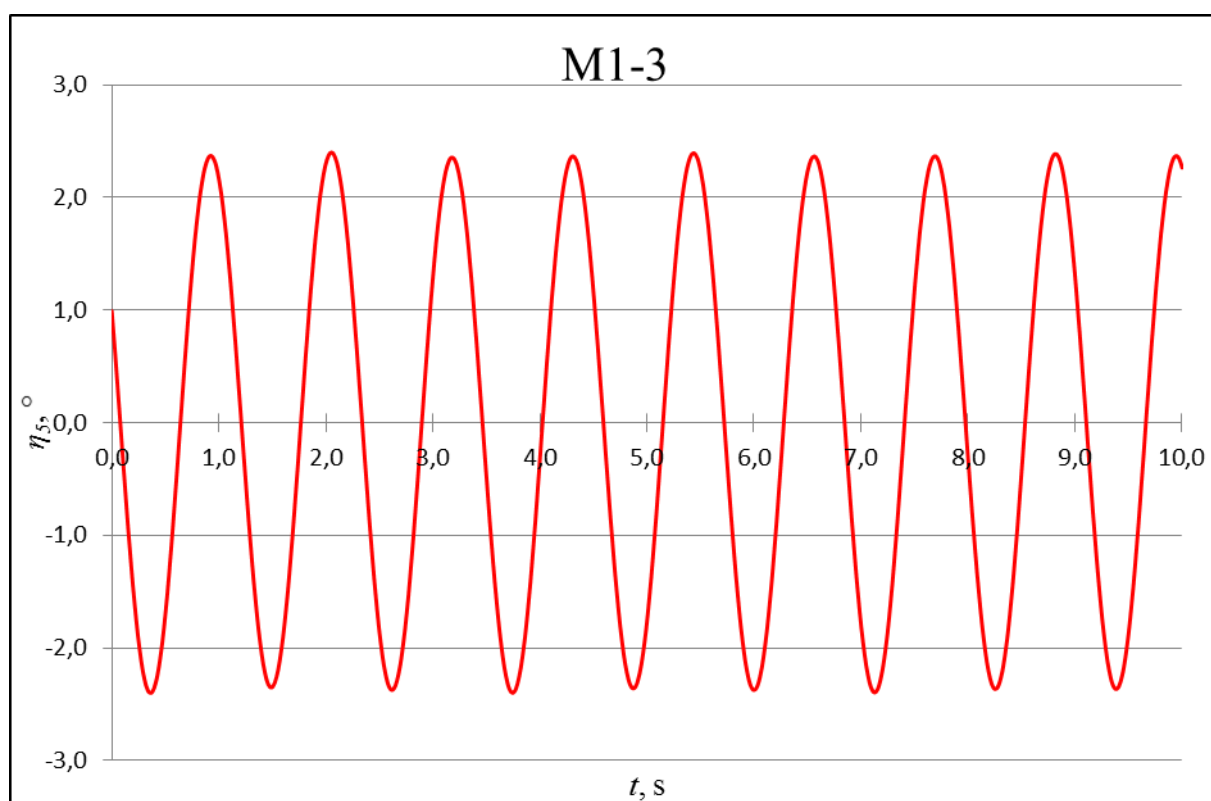
10,0	1,92974	-2,18503	2,26538	1,61781
------	---------	----------	---------	---------



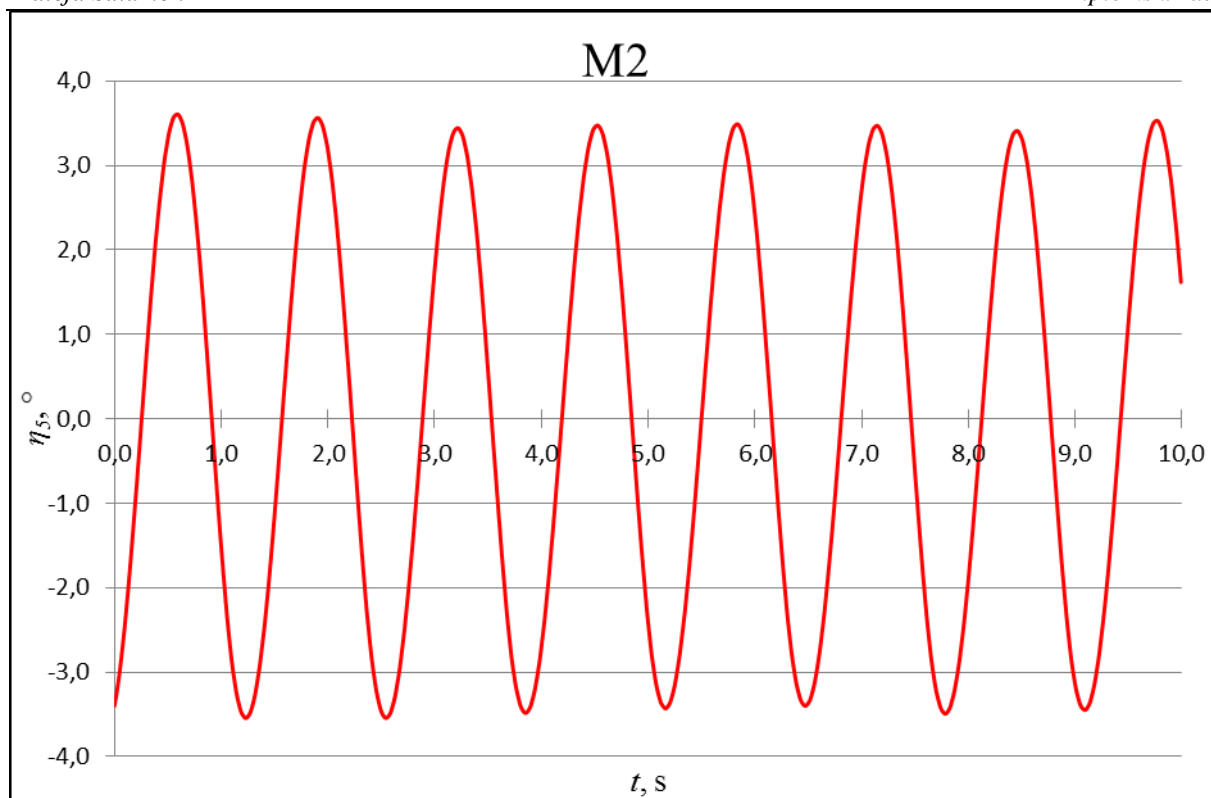
Slika 19. Amplitude posrtanja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *WISDAM-X*



Slika 20. Amplitude posrtanja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom WISDAM-X



Slika 21. Amplitude posrtanja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom WISDAM-X



Slika 22. Amplitude posrtanja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *WISDAM-X*

4.3. Analiza rezultata dobivenih programskim paketom *HydroSTAR*

HydroSTAR se temelji na teoriji potencijalnog strujanja i omogućuje izračun gibanja i sila prvog i drugog reda na temelju karakteristika modela i ulaznih parametara valova. Omogućuje izračun difrakcijske i radijacijske komponente dodatnog otpora broda, interakciju broda i valova te međudjelovanje više tijela itd. [15].

Njihanja su izražena su kao prijenosne funkcije jedinične valne amplitude H_{η_a} . Kako bi se izračunale amplitude poniranja i posrtanja za određenu valnu visinu potrebno je prijenosnu funkciju pomnožiti valnom amplitudom:

$$\eta_3 = H_{\eta_3} \zeta \quad (82)$$

$$\eta_5 = H_{\eta_5} \zeta \quad (83)$$

gdje je:

η_3 - amplituda poniranja,

η_5 - amplituda posrtanja,

H_{η_3} - prijenosna funkcija poniranja,

H_{η_s} - prijenosna funkcija posrtanja.

Za prikaz njihovanja u vremenskoj domeni potrebno je izračunati susretnu frekvenciju ω_e prema jednadžbi (7) te je potrebno koristiti jednadžbu (16) za poniranje i jednadžbu (18) za posrtanje.

U tablici 7. prikazane su vrijednosti prijenosne funkcije i fazni pomaci dobiveni programskim paketom *HydroSTAR* te izračunate amplitude njihovanja i susretne frekvencije za svaki pojedini slučaj. Indeks H označava vrijednosti dobivene programskim paketom *HydroSTAR*.

Tablica 7. Vrijednosti susretnih frekvencija te prijenosnih funkcija poniranja i posrtanja za model 1 određene programskim paketom *HydroSTAR*

	ω_e [s ⁻¹]	Poniranje			Posrtanje		
		η_{3H}/ζ [m/m]	η_{3H} [m]	ε_{3H}	η_{5H}/ζ [°/m]	η_{5H} [°]	ε_{5H}
M1-1	5,6324	1,2778	0,0558	298,93	56,1133	2,4505	186,1
M1-2	3,8807	1,2051	0,0878	4,44	50,1752	3,6593	236,36
M1-3	5,5942	1,6845	0,0823	303,46	57,2589	2,8006	195,93
M2	4,7851	1,2763	0,1569	298,29	40,3423	4,9621	185,92

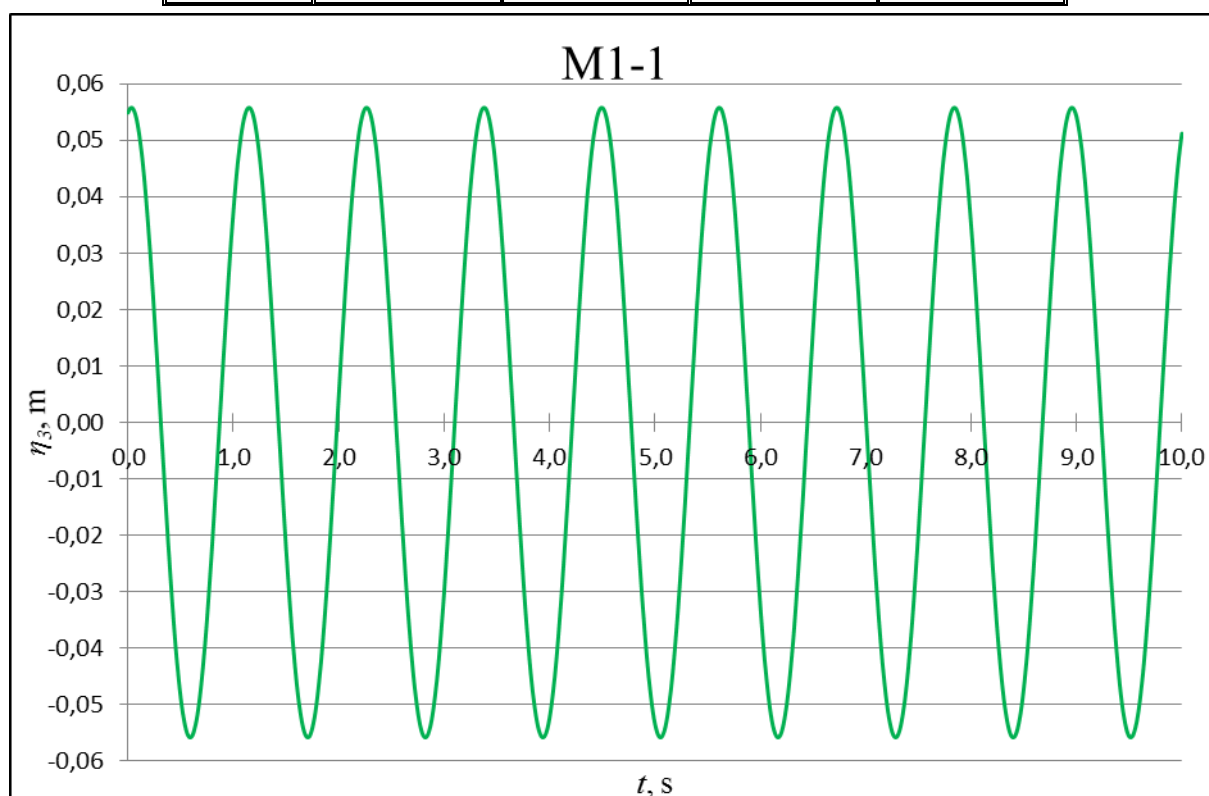
4.3.1. Amplitude poniranja

U tablici 8. te na slikama 23. - 26. prikazane su amplitude odziva u vremenskoj domeni za model 1 i model 2 pri plovidbi na Froudeovom broju $Fn = 0,26$ za slučajeve M1-1, M1-2 i M2 te $Fn = 0,33$ za slučaj M1-3.

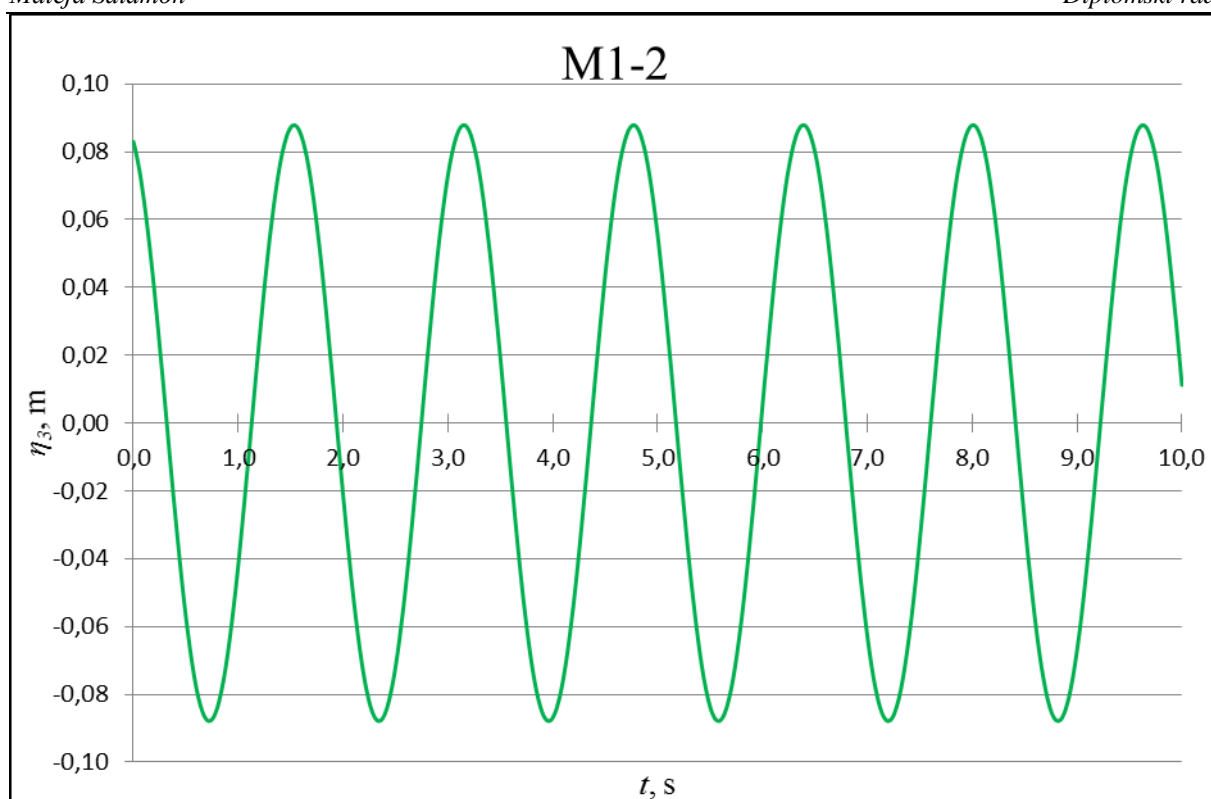
Tablica 8. Vrijednosti amplituda poniranja u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *HydroSTAR*

Vrijeme, t [s]	Poniranje, η_{3H} [m]			
	M1-1	M1-2	M1-3	M2
0,0	0,05487	0,08302	0,06680	-0,13434
0,3	0,00356	0,00632	-0,05513	-0,09860
0,6	-0,05572	-0,07802	-0,05497	0,10775
0,9	0,00966	-0,06803	0,06692	0,12766
1,2	0,05343	0,02421	0,04061	-0,07332
1,5	-0,02234	0,08718	-0,07563	-0,14743
1,8	-0,04813	0,04474	-0,02439	0,03356
2,1	0,03376	-0,05179	0,08087	0,15648
2,4	0,04012	-0,08571	0,00704	0,00864
2,7	-0,04327	-0,01600	-0,08238	-0,15415
3,0	-0,02985	0,07306	0,01063	-0,05021
3,3	0,05036	0,07378	0,08010	0,14061

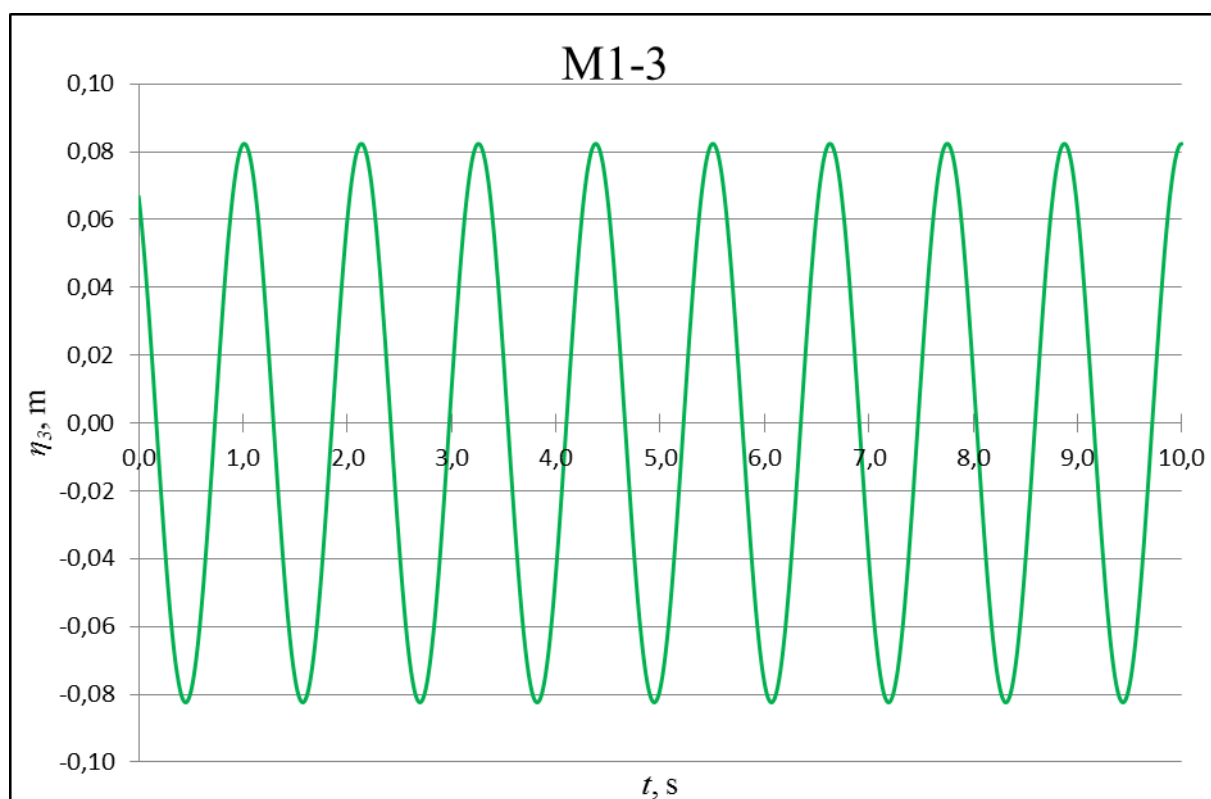
3,6	0,01790	-0,01470	-0,02781	0,08813
3,9	-0,05461	-0,08541	-0,07413	-0,11684
4,2	-0,00494	-0,05285	0,04371	-0,11965
4,5	0,05578	0,04361	0,06475	0,08457
4,8	-0,00829	0,08734	-0,05761	0,14245
5,1	-0,05381	0,02547	-0,05239	-0,04615
5,4	0,02106	-0,06719	0,06884	-0,15490
5,7	0,04881	-0,07862	0,03763	0,00438
6,0	-0,03264	0,00501	-0,07692	0,15608
6,3	-0,04107	0,08258	-0,02113	0,03772
6,6	0,04239	0,06030	0,08145	-0,14591
6,9	0,03101	-0,03489	0,00365	-0,07707
7,2	-0,04975	-0,08789	-0,08223	0,12512
7,5	-0,01921	-0,03463	0,01399	0,11081
7,8	0,05430	0,06050	0,07923	-0,09524
8,1	0,00632	0,08249	-0,03098	-0,13650
8,4	-0,05580	0,00474	-0,07258	0,05843
8,7	0,00692	-0,07874	0,04655	0,15225
9,0	0,05416	-0,06701	0,06260	-0,01737
9,3	-0,01977	0,02574	-0,05998	-0,15694
9,6	-0,04947	0,08737	-0,04973	-0,02496
9,9	0,03151	0,04337	0,07065	0,15021
10,0	0,05123	0,01121	0,08238	0,15435



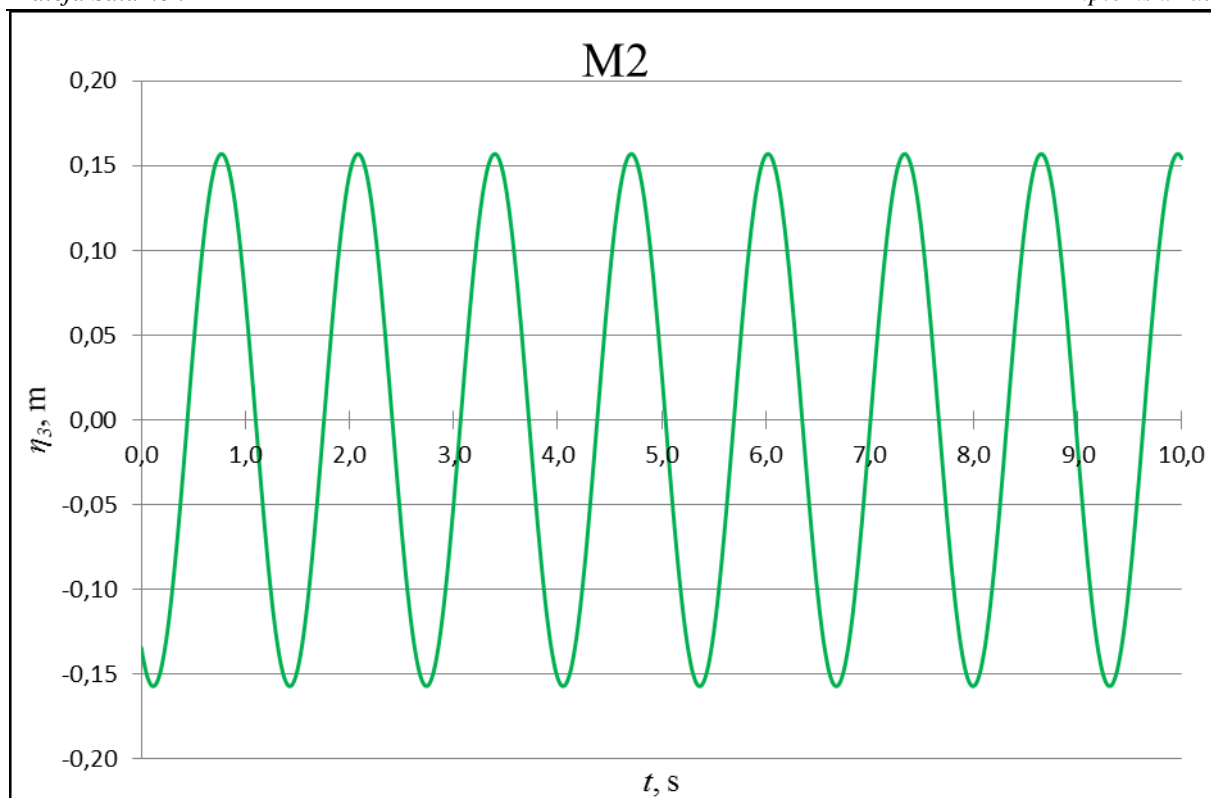
Slika 23. Amplitude poniranja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *HydroSTAR*



Slika 24. Amplitude poniranja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *HydroSTAR*



Slika 25. Amplitude poniranja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *HydroSTAR*



Slika 26. Amplitude poniranja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *HydroSTAR*

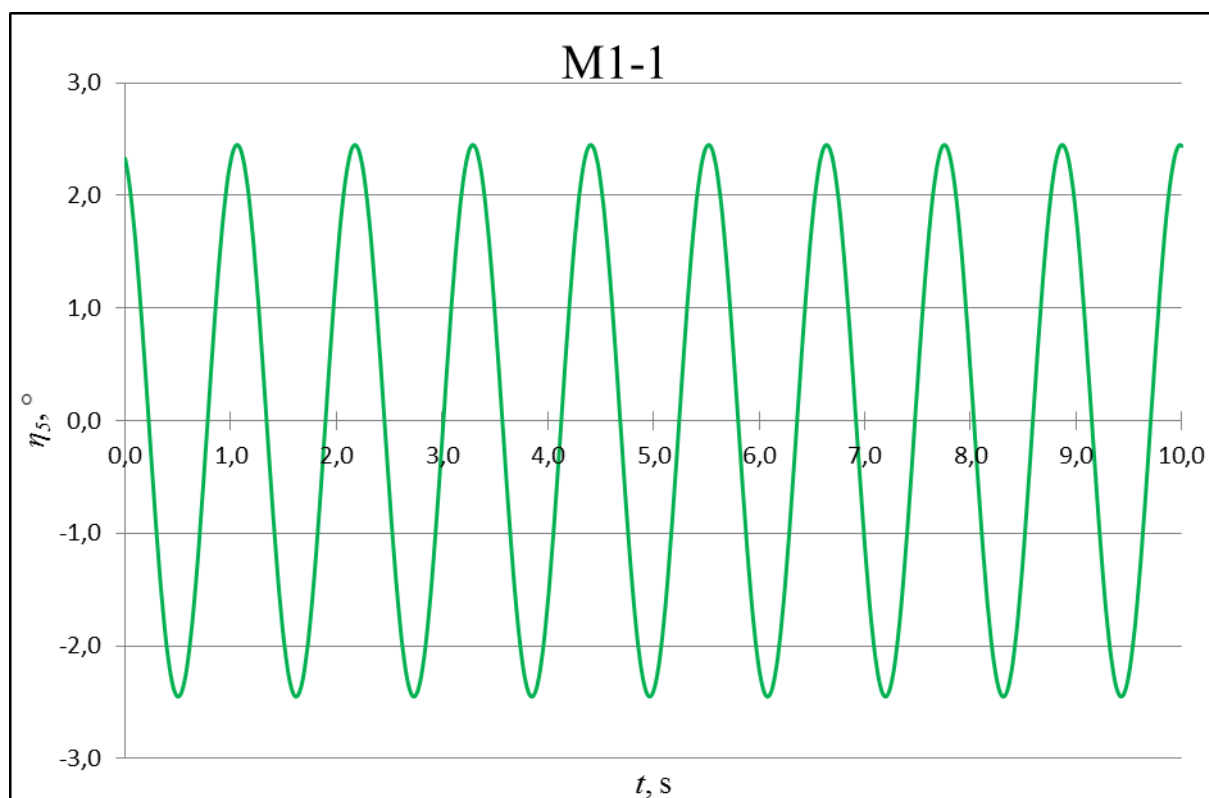
4.3.2. Amplitude posrtanja

U tablici 9. te na slikama 27. - 30. prikazane su amplitude odziva u vremenskoj domeni za model 1 i model 2 pri plovidbi na Froudeovom broju $Fn = 0,26$ za slučajeve M1-1, M1-2 i M2 te $Fn = 0,33$ za slučaj M1-3.

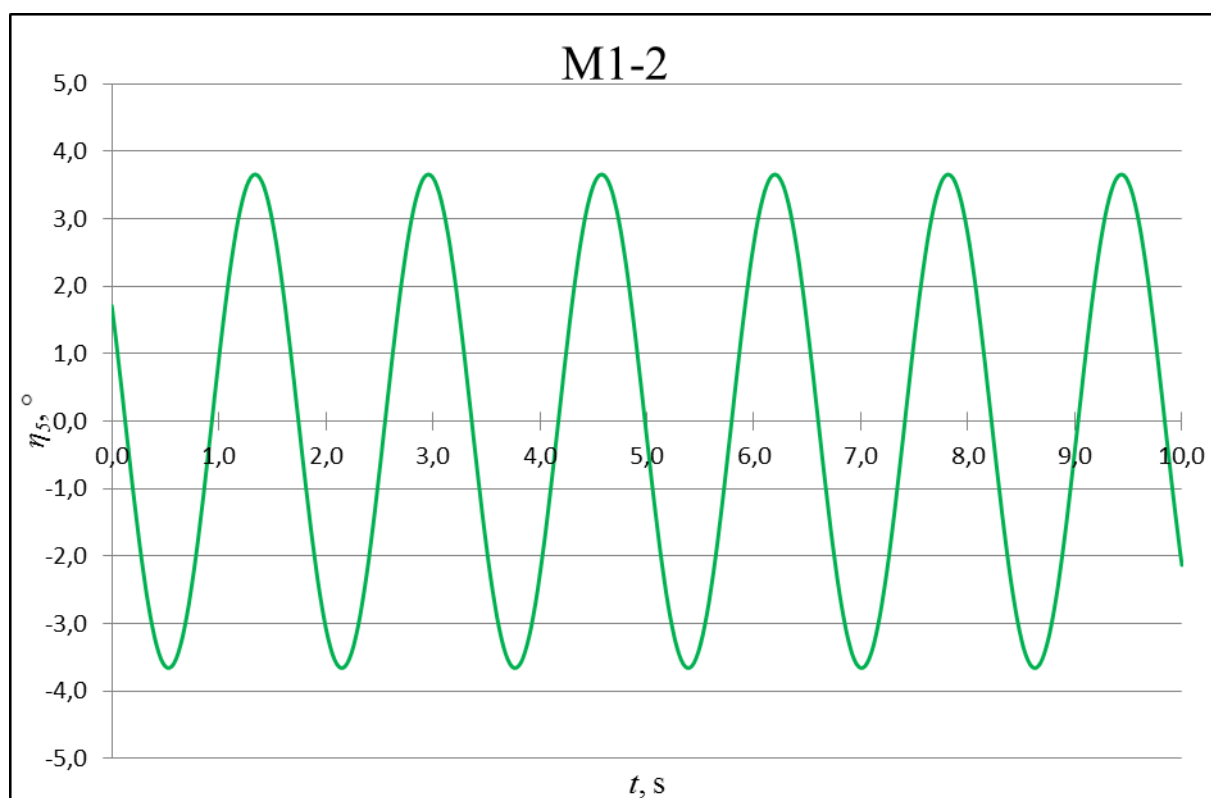
Tablica 9. Vrijednosti amplituda posrtanja u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *HydroSTAR*

Vrijeme, t [s]	Posrtanje, η_{SH} [°]			
	M1-1	M1-2	M1-3	M2
0,0	2,32891	1,71095	2,13824	-4,68484
0,3	-1,03333	-2,29438	-2,02762	0,98881
0,6	-2,08372	-3,52564	-1,70328	4,95152
0,9	1,52776	-0,49415	2,39301	0,34656
1,2	1,72120	3,13480	1,18993	-4,85805
1,5	-1,93618	2,97355	-2,64827	-1,65674
1,8	-1,26177	-0,78293	-0,62182	4,41124
2,1	2,23558	-3,59280	2,78166	2,84641
2,4	0,73129	-2,05871	0,02510	-3,64359
2,7	-2,40911	1,96450	-2,78705	-3,82905
3,0	-0,15964	3,61249	0,57277	2,61093
3,3	2,44699	0,89272	2,66418	4,53320

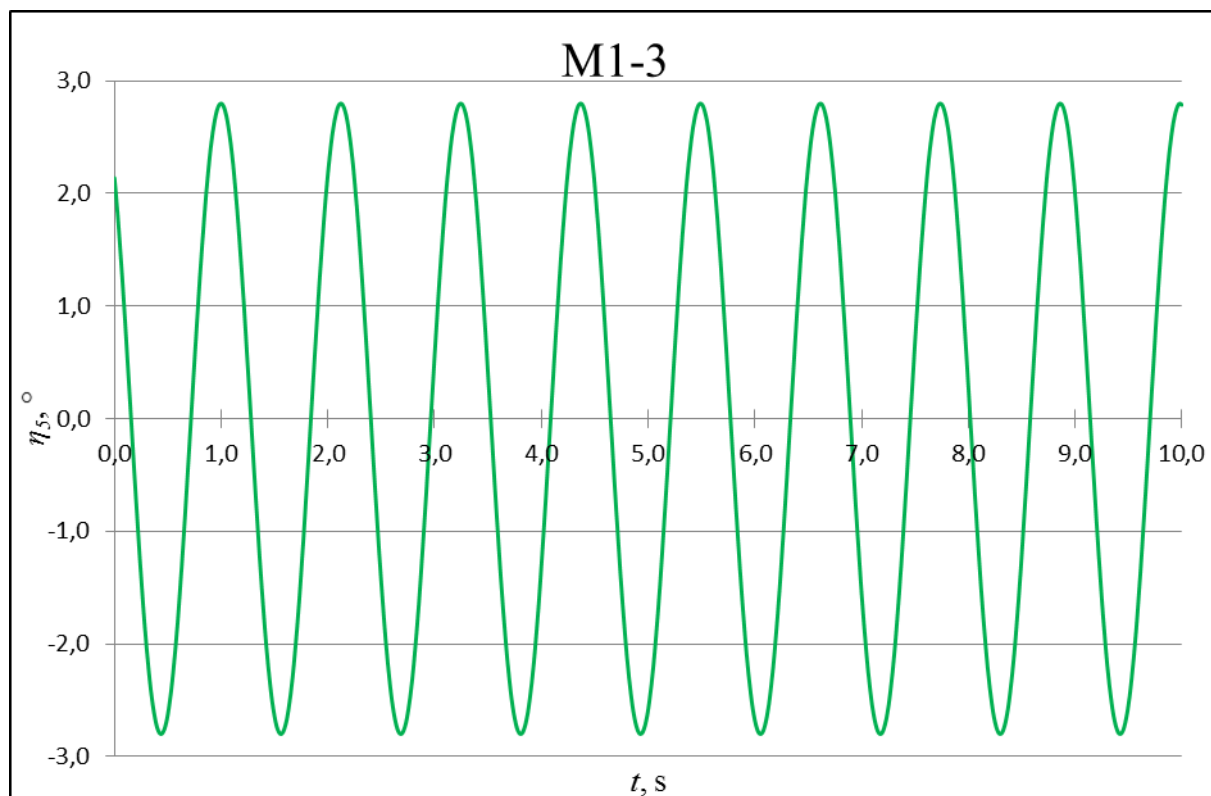
3,6	-0,42100	-2,90641	-1,14429	-1,38837
3,9	-2,34709	-3,19149	-2,41870	-4,90763
4,2	0,97793	0,38217	1,66315	0,06483
4,5	2,11504	3,49376	2,06193	4,92511
4,8	-1,47980	2,38114	-2,10547	1,26343
5,1	-1,76391	-1,61045	-1,61026	-4,58438
5,4	1,89835	-3,65489	2,45090	-2,49979
5,7	1,31345	-1,28031	1,08450	3,91020
6,0	-2,21002	2,64226	-2,68355	3,55434
6,3	-0,78904	3,37015	-0,50882	-2,95163
6,6	2,39725	0,02329	2,79270	-4,35037
6,9	0,22021	-3,35173	-0,09027	1,77838
7,2	-2,44950	-2,67427	-2,77334	4,82998
7,5	0,36103	1,23657	0,68520	-0,47577
7,8	2,36383	3,65231	2,62635	-4,95829
8,1	-0,92193	1,65214	-1,24860	-0,86143
8,4	-2,14507	-2,34558	-2,35850	4,72597
8,7	1,43093	-3,50733	1,75455	2,13598
9,0	1,80553	-0,42846	1,98211	-4,14992
9,3	-1,85936	3,16844	-2,17975	-3,25518
9,6	-1,36433	2,93448	-1,51452	3,27202
9,9	2,18310	-0,84748	2,50464	4,13761
10,0	2,44023	-2,13152	2,78785	2,41163



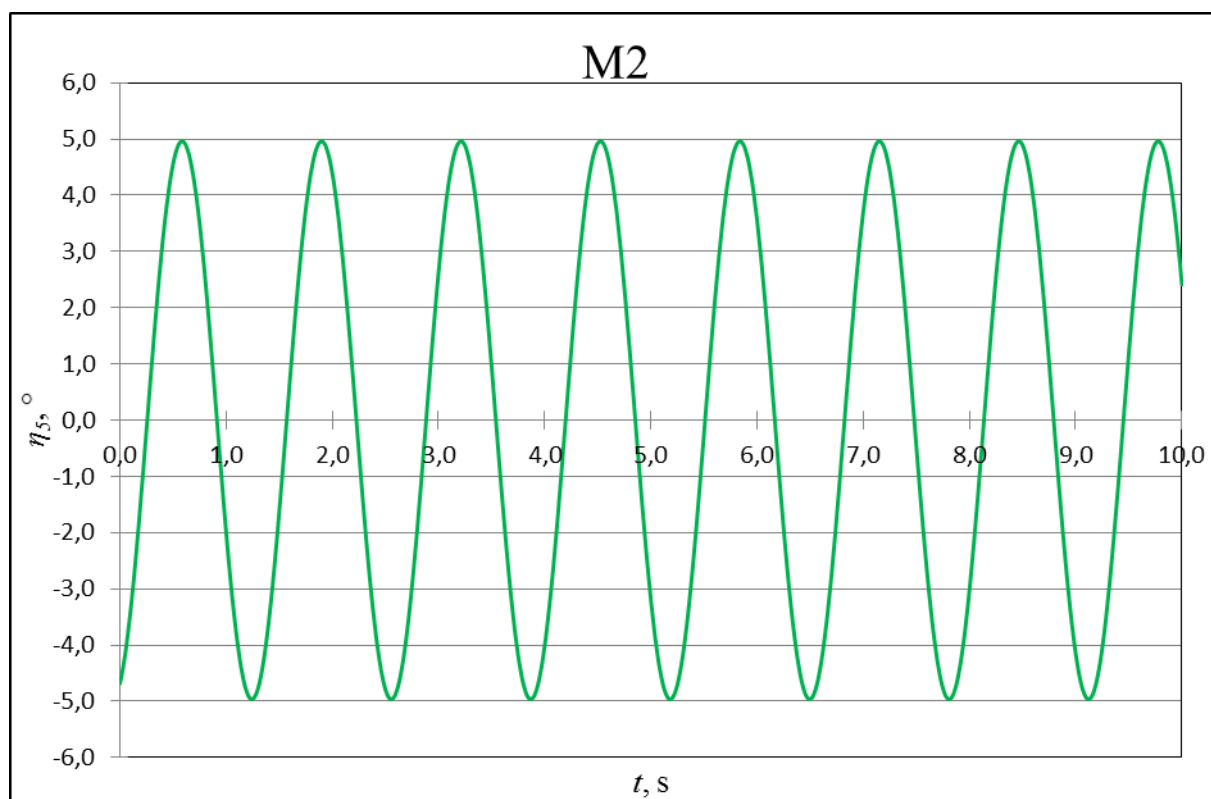
Slika 27. Amplitude posrtanja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *HydroSTAR*



Slika 28. Amplitude posrtanja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *HydroSTAR*



Slika 29. Amplitude posrtanja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *HydroSTAR*



Slika 30. Amplitude posrtanja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunate programskim paketom *HydroSTAR*

5. USPOREDBA REZULTATA ODZIVA BRODA U VREMENSKOJ DOMENI

5.1. Usporedba rezultata odziva izračunatih programskim paketima

Programski paketi *WISDAM-X* i *HydroSTAR* razlikuju se, kao što je prethodno objašnjeno, u pristupu rješavanja problema odziva broda na valovima što uzrokuje razlike u amplitudama odziva. Kako bi se procijenilo relativno odstupanje te dvije metode, potrebno ih je usporediti.

U tablicama 10. i 11. dane su usporedbe osrednjenih amplituda odziva poniranja i posrtanja. Kao referentne veličine uzete su vrijednosti dobivene programskim paketom *HydroSTAR* te je izračunato relativno odstupanje programskog paketa *WISDAM-X* takvo da je :

$$\xi_i = \left(1 - \frac{\eta_{iW}}{\eta_{iH}} \right) 100\% \quad (84)$$

gdje je:

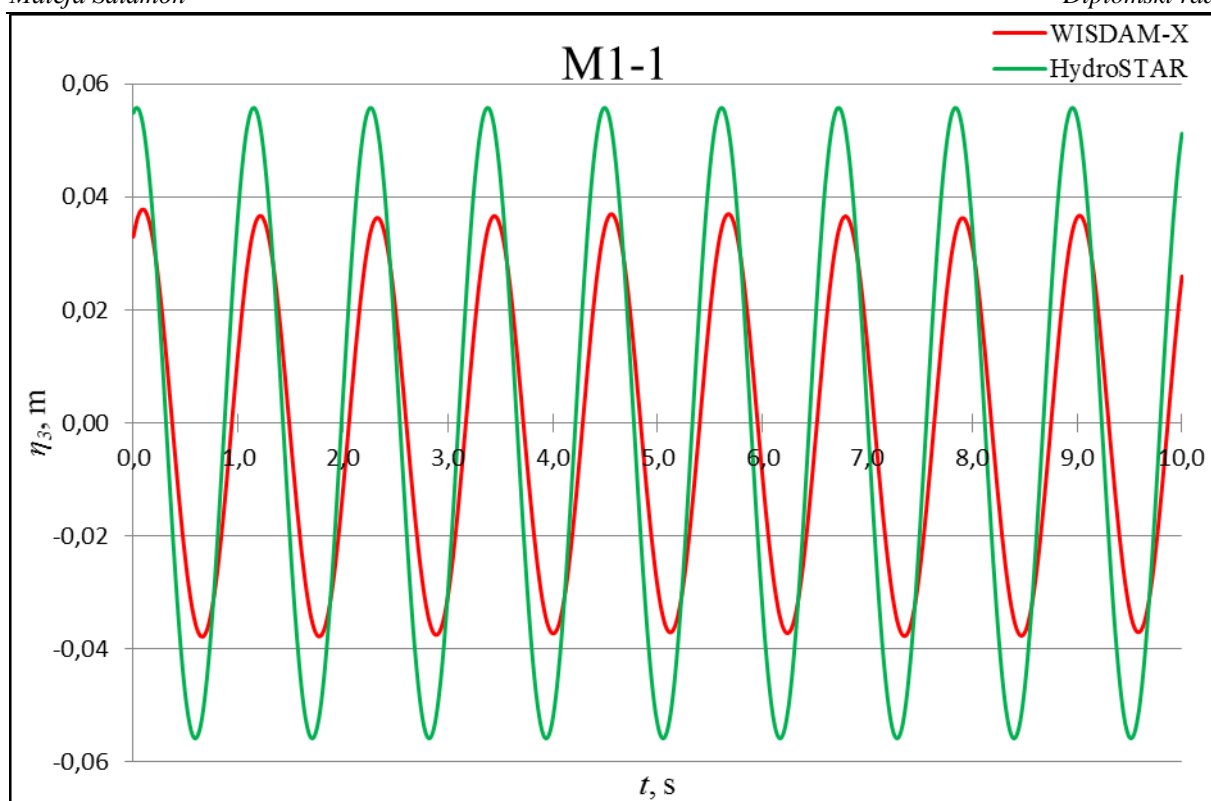
ξ_i - relativno odstupanje,

η_{iW}, η_{iH} - osrednjene amplitude odziva izračunate pomoću dva programska paketa.

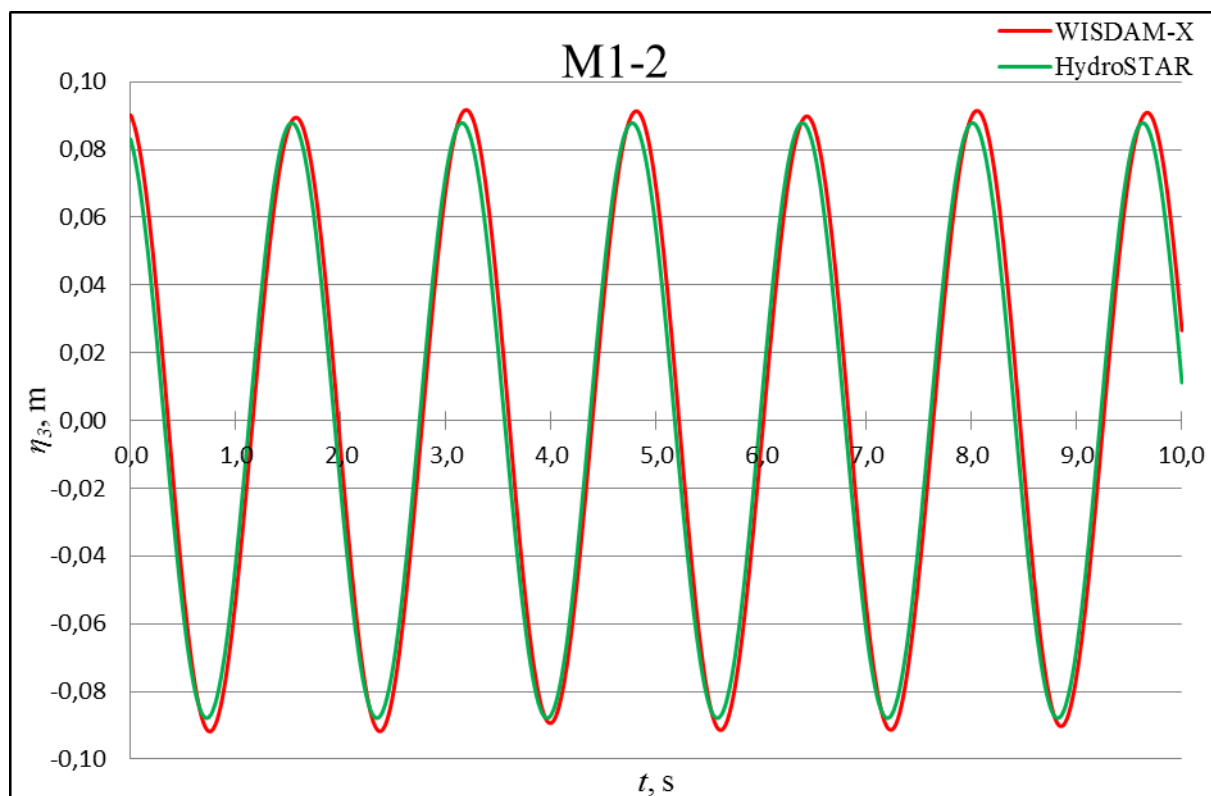
Indeks i mijenja se u ovisnosti o odzivu tako da poprima vrijednost 3 za poniranje, a vrijednost 5 za posrtanje.

5.1.1. Usporedba rezultata poniranja

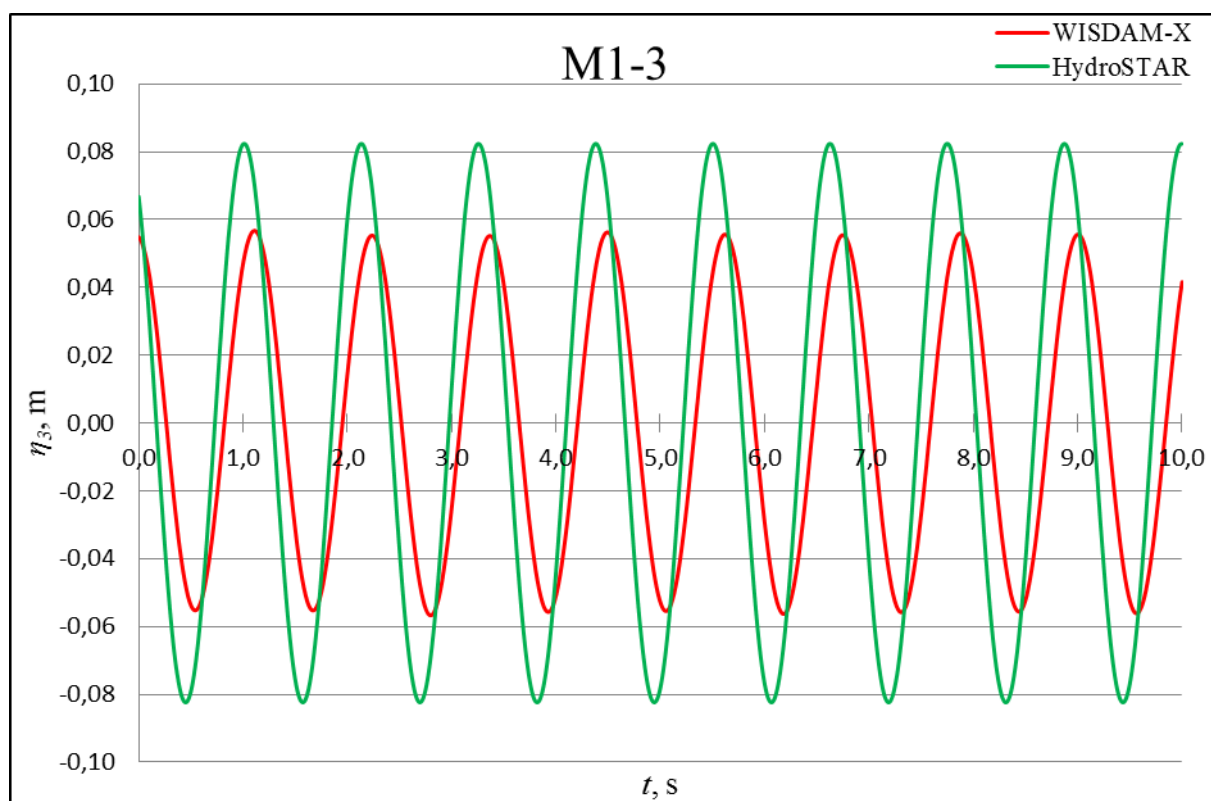
Na slikama 31. - 34. prikazani su odzivi poniranja broda na valovima izračunati pomoću dva programska paketa za Froudeov broj $Fn = 0,26$ za slučajeve M1-1, M1-2 i M2 te Froudeov broj $Fn = 0,33$ za slučaj M1-3. Vrijednosti amplituda poniranja dane su u tablicama 5. i 8.



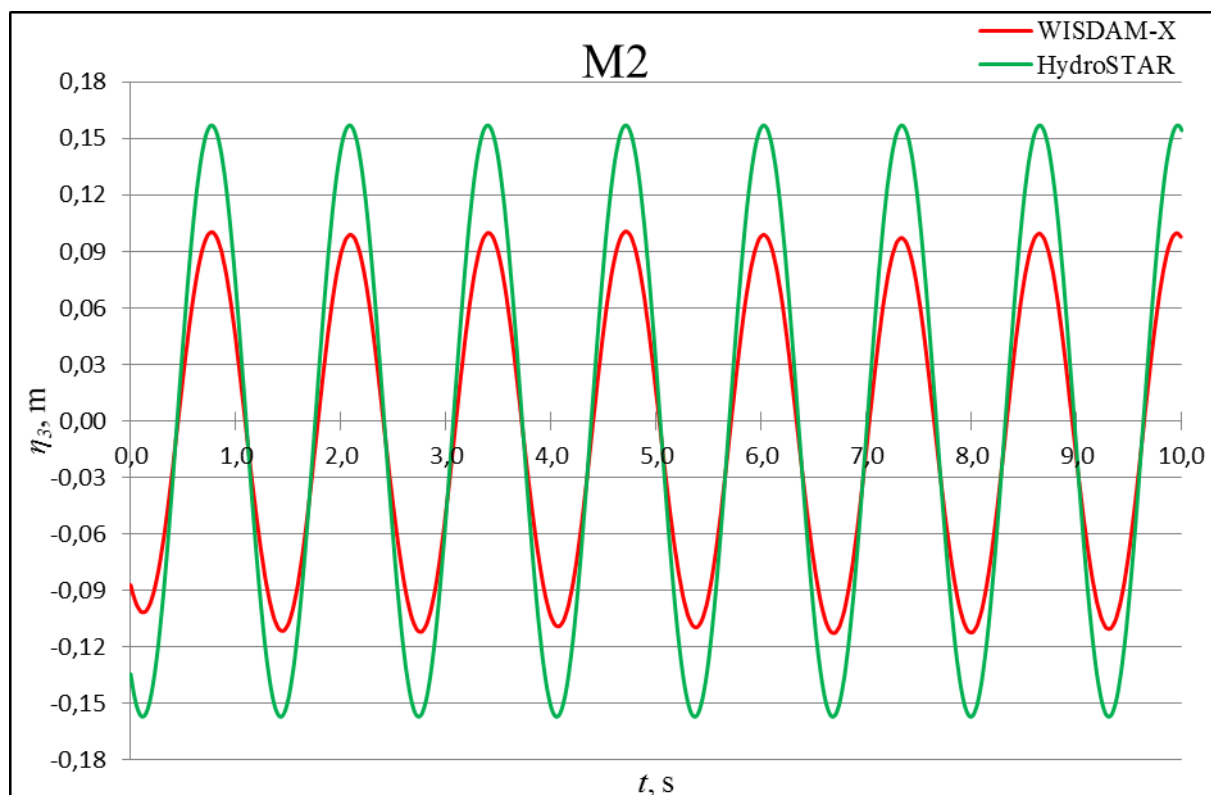
Slika 31. Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X*



Slika 32. Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X*



Slika 33. Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X*



Slika 34. Usporedba amplituda poniranja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X*

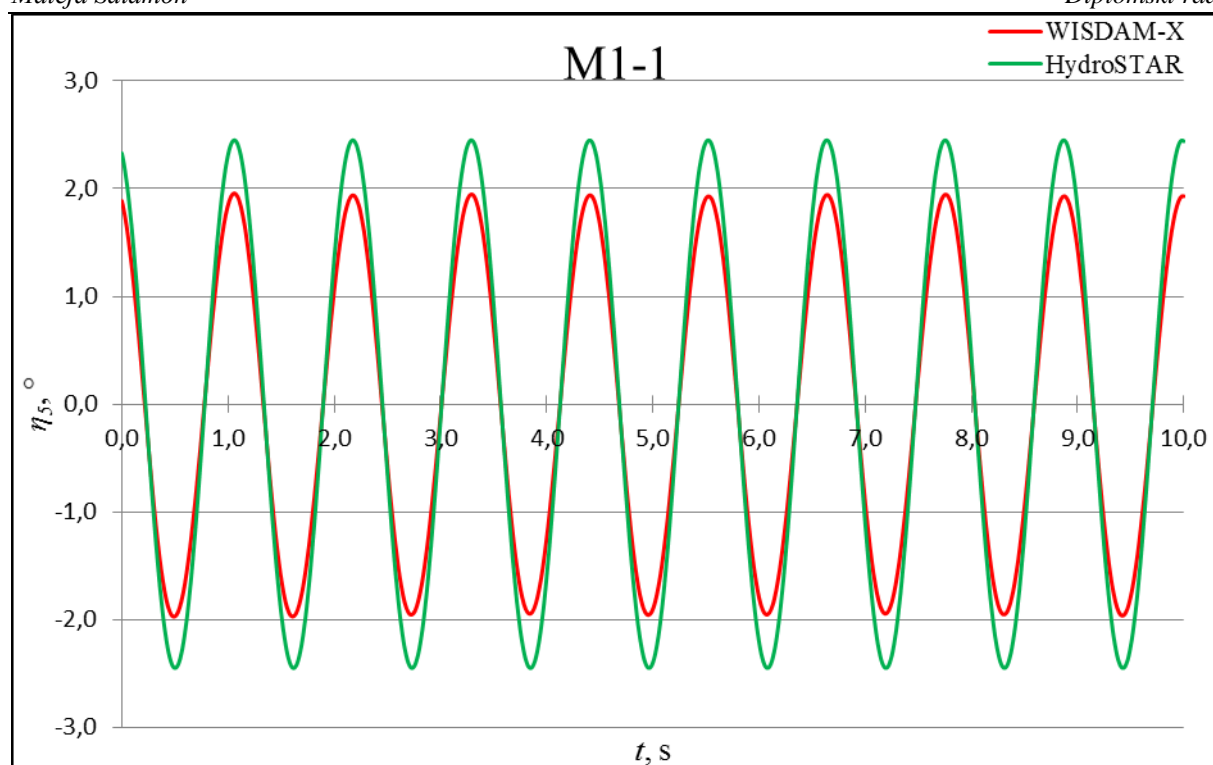
Tablica 10. Osrednjene vrijednosti amplituda poniranja izračunate pomoću dva programska paketa te relativno odstupanje rezultata

	η_{3W} [m]	η_{3H} [m]	Relativno odstupanje, ξ_3 [%]
M1-1	0,0378	0,0558	32,2
M1-2	0,0917	0,0878	-4,4
M1-3	0,0567	0,0823	31,1
M2	0,1066	0,1569	32,1

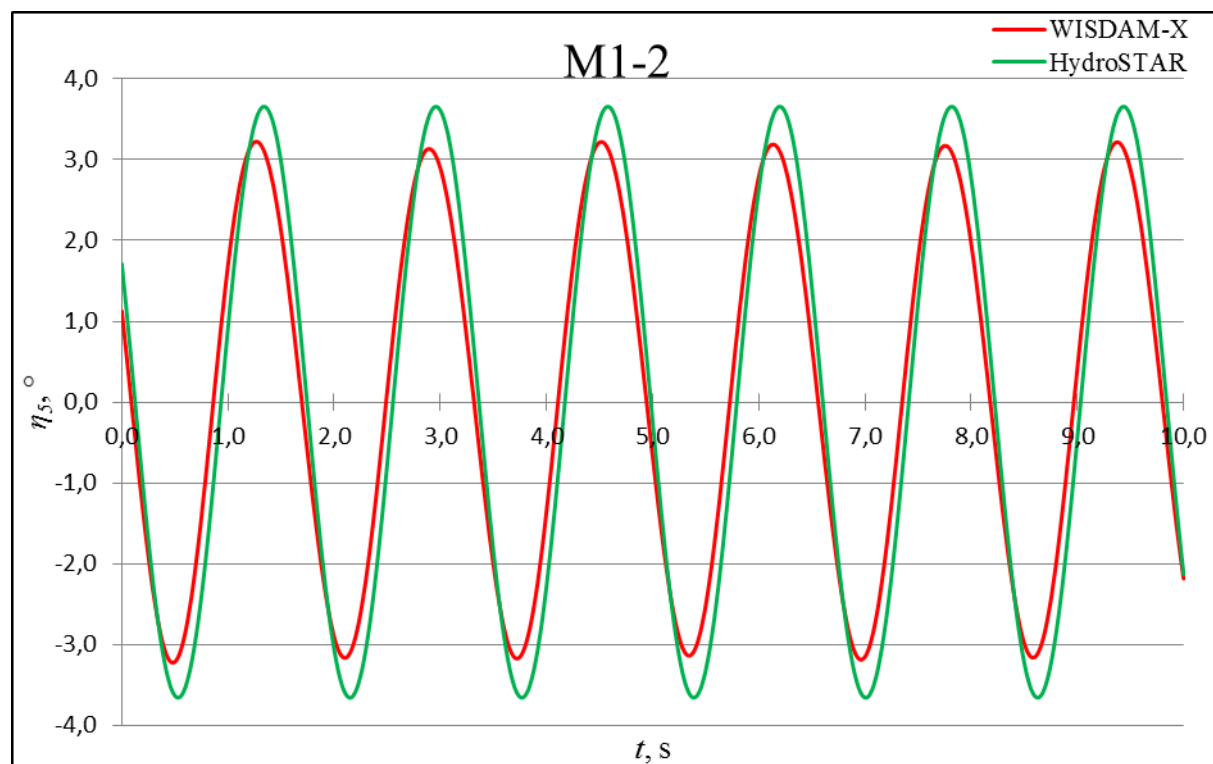
Iz tablice 10. može se vidjeti da relativno odstupanje rezultata ξ_3 za slučajeve M1-1 i M2 poprima slične vrijednosti što se može objasniti činjenicom da relativna valna duljina za ta dva slučaja također ima slične vrijednosti te za slučaj M1-1 ima vrijednost $\lambda/L_{pp} = 1,15$, a za slučaj M2 ima vrijednost $\lambda/L_{pp} = 1,1497$. Najmanje relativno odstupanje javlja se za slučaj M1-2 kod kojega je $\lambda/L_{pp} = 2$ dok je relativno odstupanje u slučaju M1-3 nešto manje nego u slučajevima M1-1 i M2 gdje je relativno odstupanje najveće. Iz ove usporedbe može se pretpostaviti da se viskozna i potencijalna teorija bolje poklapaju za odziv poniranja na većim valnim duljinama pa se može pretpostaviti da viskoznost nema velikog utjecaja na odziv poniranja na relativno velikim valnim duljinama.

5.1.2. Usporedba rezultata posrtanja

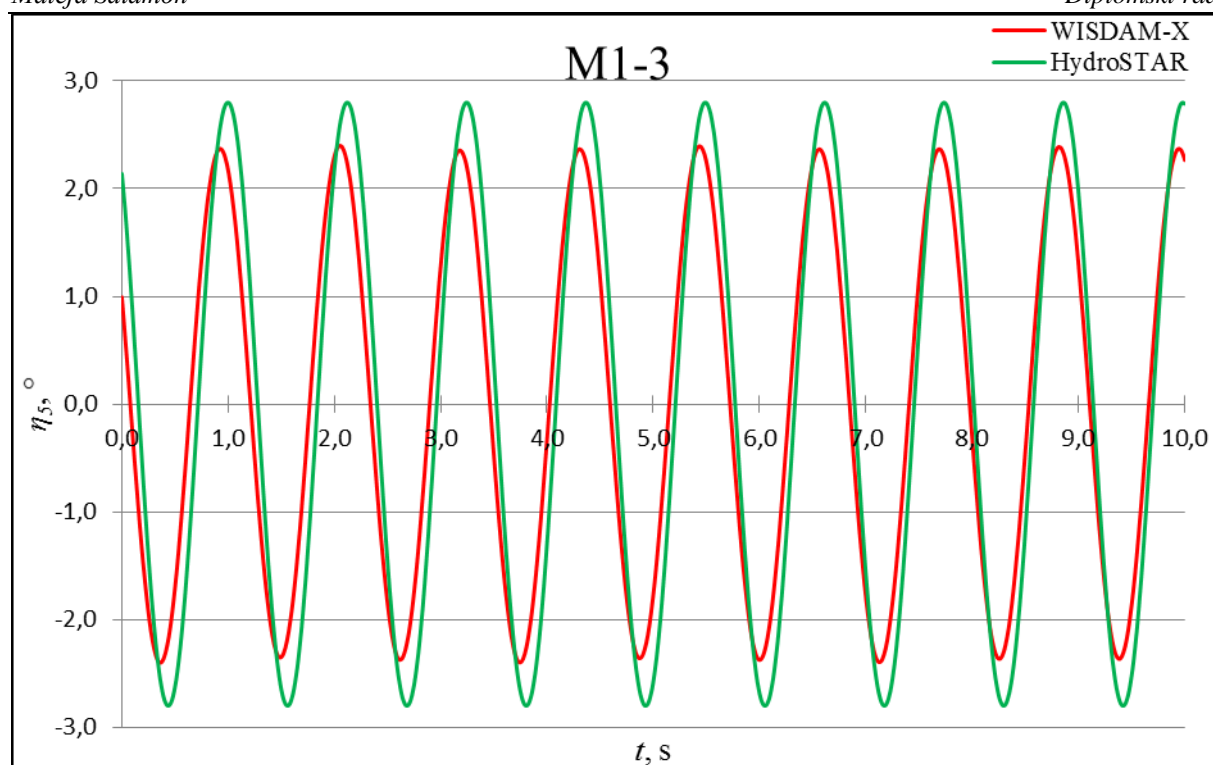
Na slikama 35. - 38. prikazani su odzivi posrtanja broda na valovima dobiveni pomoću dva programska paketa na Froudeovom broju $Fn = 0,26$ za slučajeve M1-1, M1-2 i M2 te Froudeovom broju $Fn = 0,33$ za slučaj M1-3. Vrijednosti amplituda posrtanja dane su u tablicama 6. i 9.



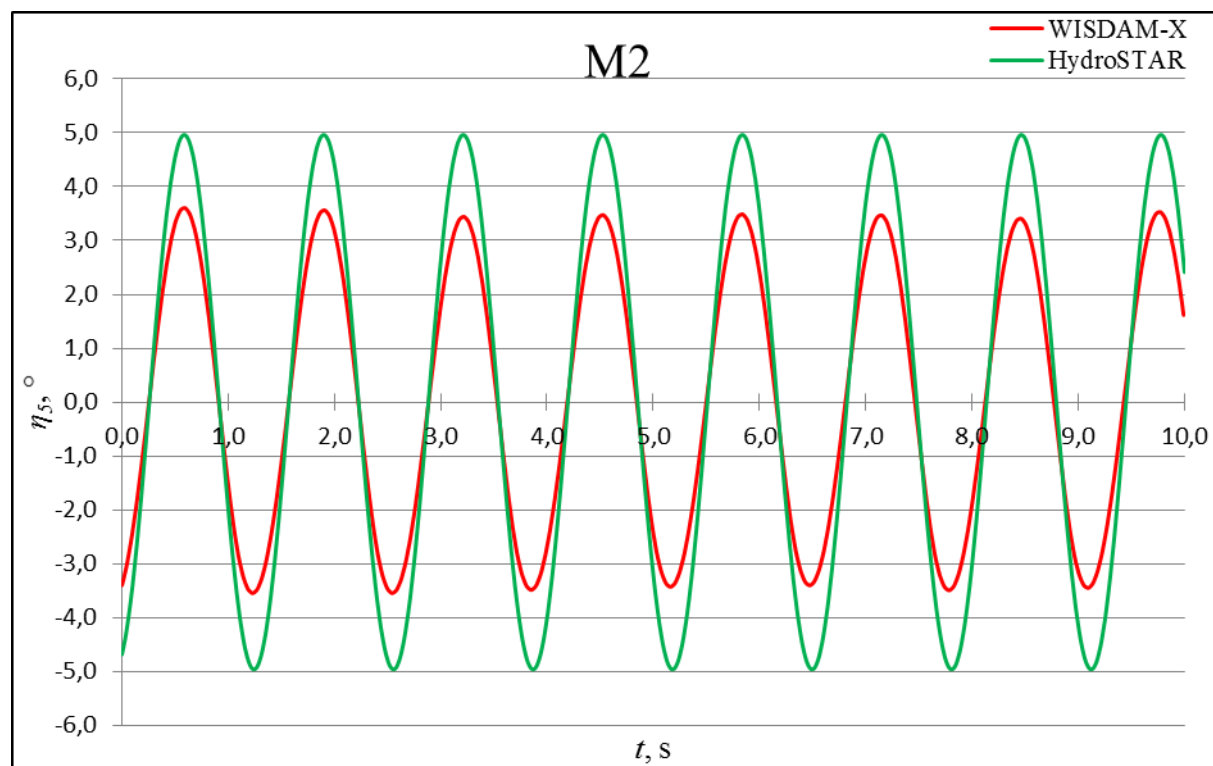
Slika 35. Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X*



Slika 36. Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X*



Slika 37. Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X*



Slika 38. Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X*

Tablica 11. Osrednjene vrijednosti amplituda posrtanja izračunate pomoću dva programska paketa te relativno odstupanje rezultata

	η_{5W} [°]	η_{5H} [°]	Relativno odstupanje, ξ_5 [%]
M1-1	1,9650	2,4505	19,8
M1-2	3,2260	3,6588	11,8
M1-3	2,4003	2,8006	14,3
M2	3,5748	4,9620	28,0

Iz tablice 11. može se vidjeti da je relativno odstupanje najmanje za slučaj M1-2 kao i kod poniranja dok se najveće relativno odstupanje javlja za slučaj M2. Može se primijetiti da se relativna odstupanja slučajeva M1-1 i M2 više razlikuju nego kod poniranja što se može pripisati manjem utjecaju valne duljine na amplitude posrtanja. Može se pretpostaviti da viskoznost ima veći utjecaj na odziv posrtanja pri manjim relativnim valnim duljinama.

5.2. Usporedba rezultata odziva određenih numerički i eksperimentalno

Eksperimentalna ispitivanja pomorstvenih svojstava vrše se u bazenu na modelu s vlastitim pogonom. Modeli mogu biti potpuno slobodni i upravljani kormilom na daljinsko upravljanje dok se u nekim slučajevima modelu ograniče određeni stupnjevi slobode. Njihanja modela određuju se direktno ili mjerenjem ubrzanja. Valovi i relativna njihanja broda u odnosu na valove mjere se dvjema paralelnim sondama uronjenima u vodu [11].

Eksperimentalna ispitivanja većinom se vrše kako bi se analizirali relativno veliki nelinearni problemi koje je teško odrediti računalnim metodama. Uglavnom su to odziv ljuljanja, prevrtanje broda, udaranje valova u pramac te zalijevanje palube jer su te pojave nestacionarne i veoma ovisne o viskoznosti fluida. Linearni problemi određuju se eksperimentalnim ispitivanjima isključivo kako bi se pomoću njih mogla procijeniti točnost podataka dobivenih računalnim metodama. Izmjerene podatke moguće je razložiti na odgovarajuće komponente kako bi se dobili odzivi na pojedinim valnim frekvencijama. Ovakva ispitivanja pomorstvenih svojstava veoma su skupa zbog dugotrajnog smirivanja slobodne površine u bazenu te je njihov opseg vrlo velik, jer je potrebno mijenjati veliki broj parametara da bi se dobili podaci za razna stanja valova [11].

Kako bi se odredio utjecaj viskoznosti na odziv broda na valovima te kako bi se provjerila točnost numeričkih proračuna programskih paketa *WISDAM-X* i *HydroSTAR* potrebno je

usporediti rezultate dobivene pomoću dva programska paketa s dostupnim eksperimentalnim rezultatima. Indeksom E označene su vrijednosti odziva dobivene eksperimentalnim ispitivanjem.

U tablicama 13. i 15. dana je usporedba osrednjenih amplituda odziva poniranja i posrtanja. Odstupanje numeričkih rezultata dobivenih pomoću dva programska paketa dano je u odnosu na eksperimentalne podatke kako slijedi:

$$\xi_{iW} = \left(1 - \frac{\eta_{iW}}{\eta_{iE}} \right) 100\% \quad (85)$$

$$\xi_{iH} = \left(1 - \frac{\eta_{iH}}{\eta_{iE}} \right) 100\% \quad (86)$$

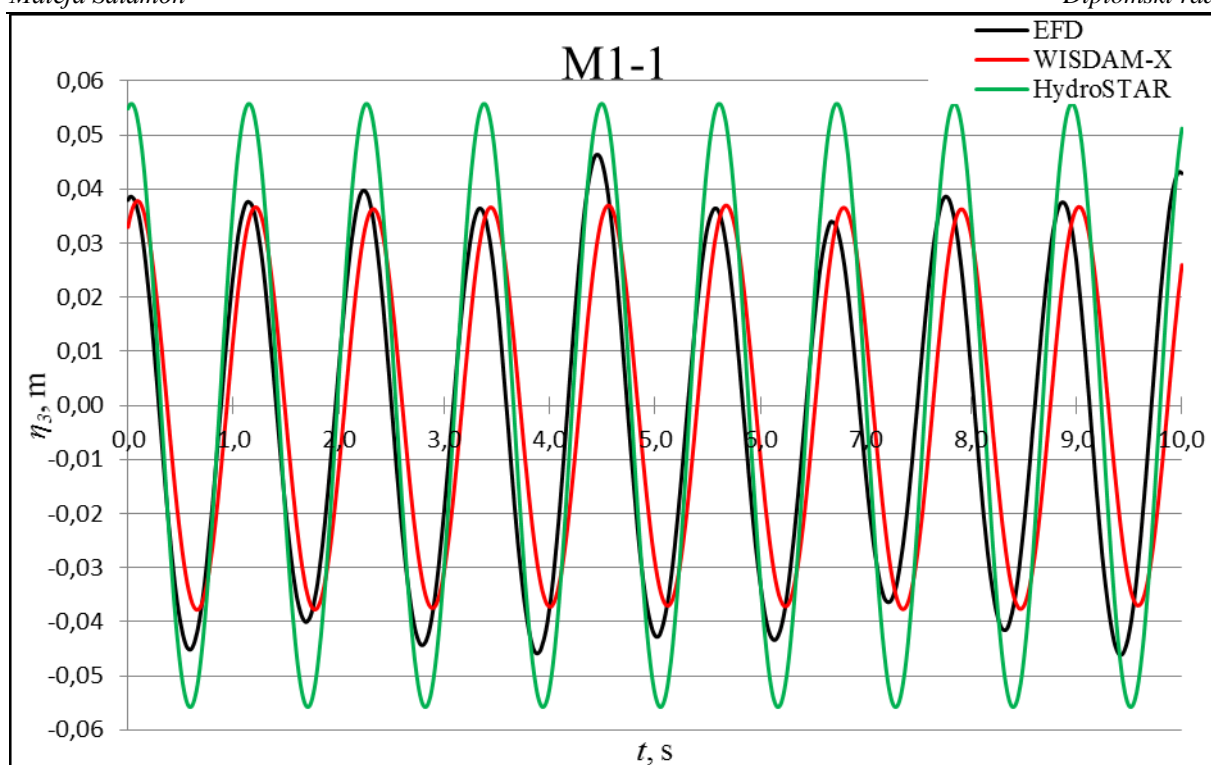
Indeks i mijenja se u ovisnosti o odzivu tako da poprima vrijednost 3 za poniranje, a vrijednost 5 za posrtanje. Indeks W odnosi se na programski paket *WISDAM-X*, indeks H na programski paket *HydroSTAR*, a indeks E na eksperimentalne podatke.

5.2.1. Usporedba rezultata poniranja

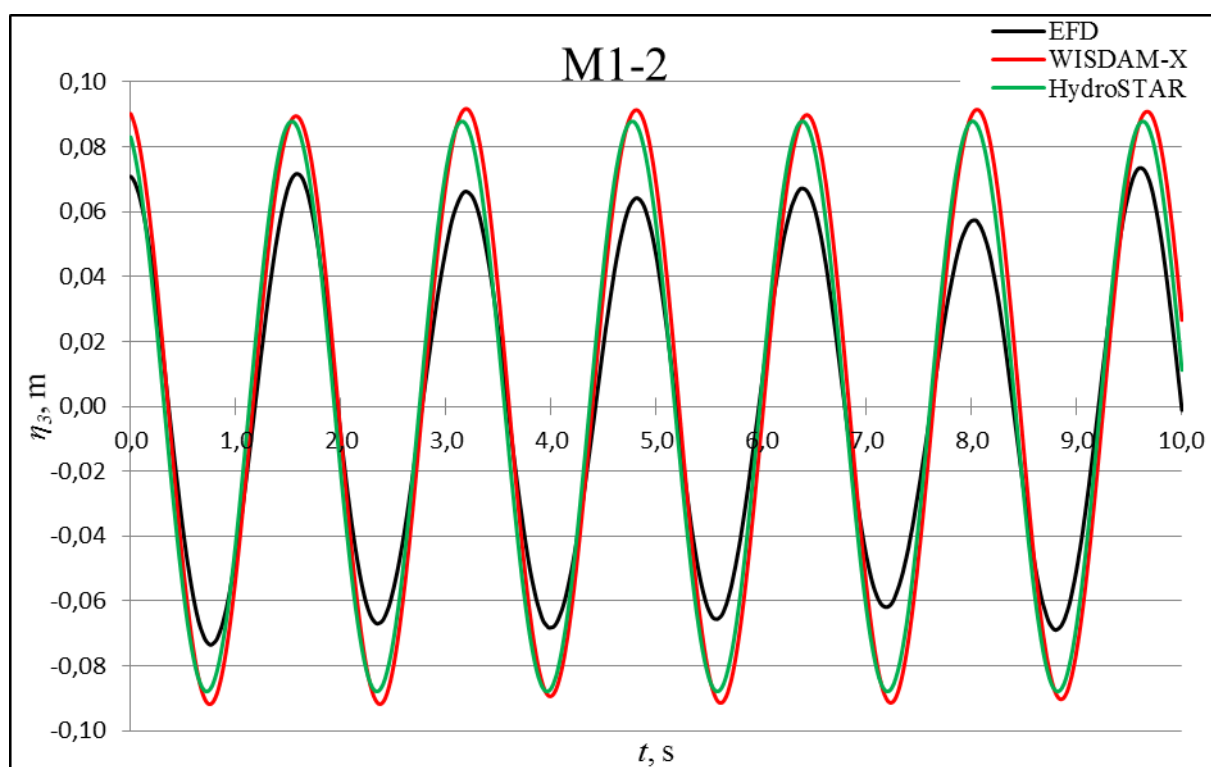
Na slikama 39. - 41. uspoređeni su odzivi poniranja broda na valovima izračunati pomoću dva programska paketa s dostupnim eksperimentalnim podacima na Froudeovom broju $Fn = 0,26$ za slučajeve M1-1 i M1-2 te na Froudeovom broju $Fn = 0,33$ za slučaj M1-3. Vrijednosti rezultata poniranja dobivenih pomoću dva programska paketa dani su u tablicama 5. i 8. dok su rezultati dostupnih eksperimentalnih podataka dani u tablici 12.

Tablica 12. Dostupni eksperimentalni podaci za vrijednosti amplituda poniranja u vremenskoj domeni za pojedine slučajeve

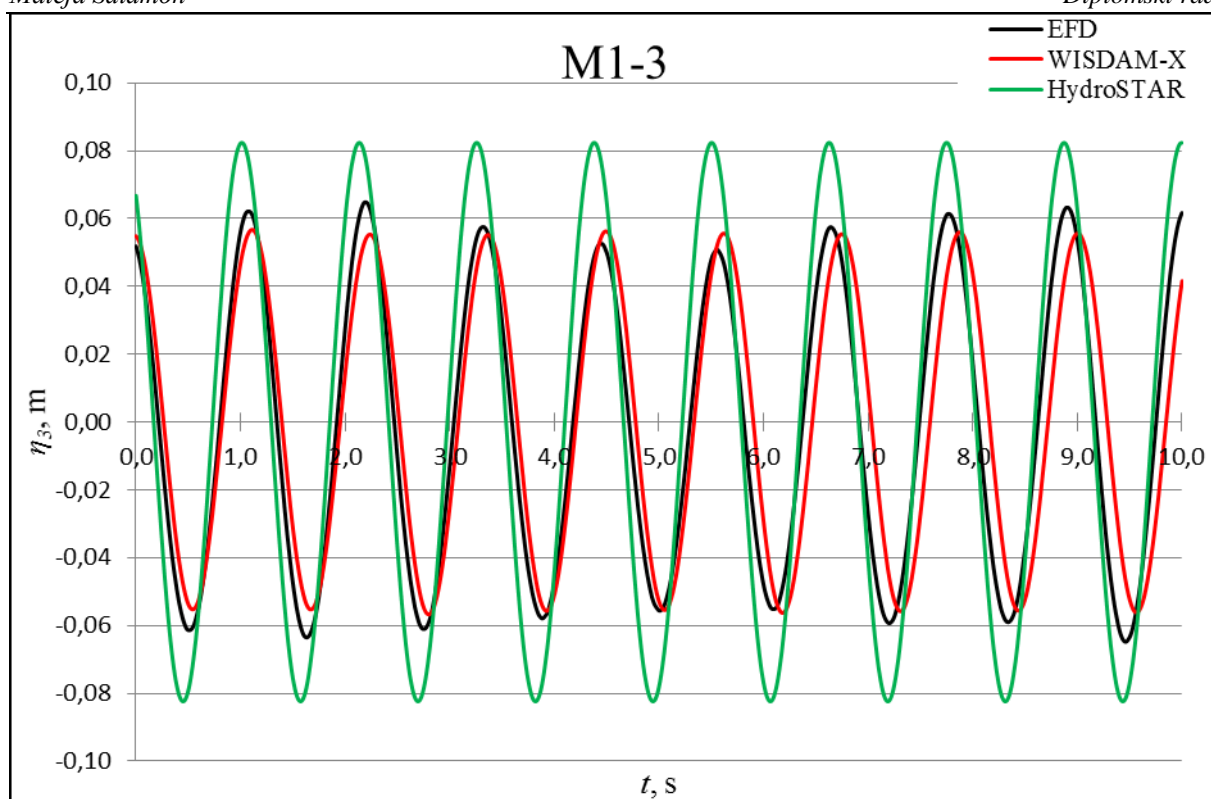
Vrijeme, t [s]	Poniranje, η_{3E} [m]		
	M1-1	M1-2	M1-3
0,0	0,03797	0,07086	0,05185
0,3	-0,00461	0,01474	-0,03043
0,6	-0,04507	-0,05950	-0,05438
0,9	0,00668	-0,06220	0,03572
1,2	0,03547	0,00468	0,04687
1,5	-0,02215	0,06866	-0,05006
1,8	-0,03270	0,04512	-0,03886
2,1	0,02896	-0,03809	0,05705
2,4	0,02251	-0,06587	0,02447
2,7	-0,04019	-0,01469	-0,05967
3,0	-0,01947	0,04874	-0,01276
3,3	0,03584	0,05939	0,05753
3,6	-0,00235	-0,00351	-0,00193
3,9	-0,04539	-0,06508	-0,05722
4,2	0,00691	-0,04946	0,00654
4,5	0,04394	0,02206	0,04890
4,8	-0,01504	0,06407	-0,02526
5,1	-0,03740	0,02112	-0,04698
5,4	0,01850	-0,05035	0,02953
5,7	0,02480	-0,05576	0,02933
6,0	-0,03305	0,00599	-0,04803
6,3	-0,02569	0,06365	-0,01900
6,6	0,02925	0,04628	0,05549
6,9	0,00576	-0,02903	0,00122
7,2	-0,03627	-0,06185	-0,05934
7,5	0,00474	-0,02263	0,00734
7,8	0,03768	0,03706	0,06065
8,1	-0,01868	0,05342	-0,01890
8,4	-0,03731	-0,00169	-0,05599
8,7	0,02218	-0,06433	0,02911
9,0	0,02649	-0,04994	0,05380
9,3	-0,03861	0,02834	-0,04402
9,6	-0,02617	0,07353	-0,04815
9,9	0,03960	0,02452	0,04895
10,0	0,04290	-0,00116	0,06172



Slika 39. Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X* s eksperimentalnim podacima



Slika 40. Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X* s eksperimentalnim podacima



Slika 41. Usporedba amplituda poniranja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X* s eksperimentalnim podacima

Tablica 13. Osrednjene vrijednosti amplituda poniranja izračunate pomoću dva programska paketa i njihovo odstupanje od eksperimentalnih podataka

	η_{3W} [m]	η_{3H} [m]	η_{3E} [m]	Relativno odstupanje <i>WISDAM-X</i> , ξ_{3W} [%]	Relativno odstupanje <i>HydroSTAR</i> , ξ_{3H} [%]
M1-1	0,0378	0,0558	0,0462	18,2	-20,7
M1-2	0,0917	0,0878	0,0735	-24,9	-19,5
M1-3	0,0567	0,0823	0,0648	12,5	-27,1

Iz tablice 13. se može vidjeti da se rezultati programskog paketa *HydroSTAR* najbolje poklapaju s eksperimentalnim podacima za slučaj M1-2 te se u tom slučaju poklapaju bolje nego podaci programskog paketa *WISDAM-X* za isti slučaj. Može se pretpostaviti da viskoznost u slučaju poniranja ima veći utjecaj na točnost rezultata pri većim relativnim valnim duljinama. Vidi se da programski paket *WISDAM-X* bolje prati eksperimentalne rezultate za relativne valne duljine manje od 2. Relativno odstupanje rezultata pokazuje da viskoznost nakon određene vrijednosti valne duljine nema utjecaja na poniranje te se odziv poniranja bolje opisuje potencijalnom teorijom.

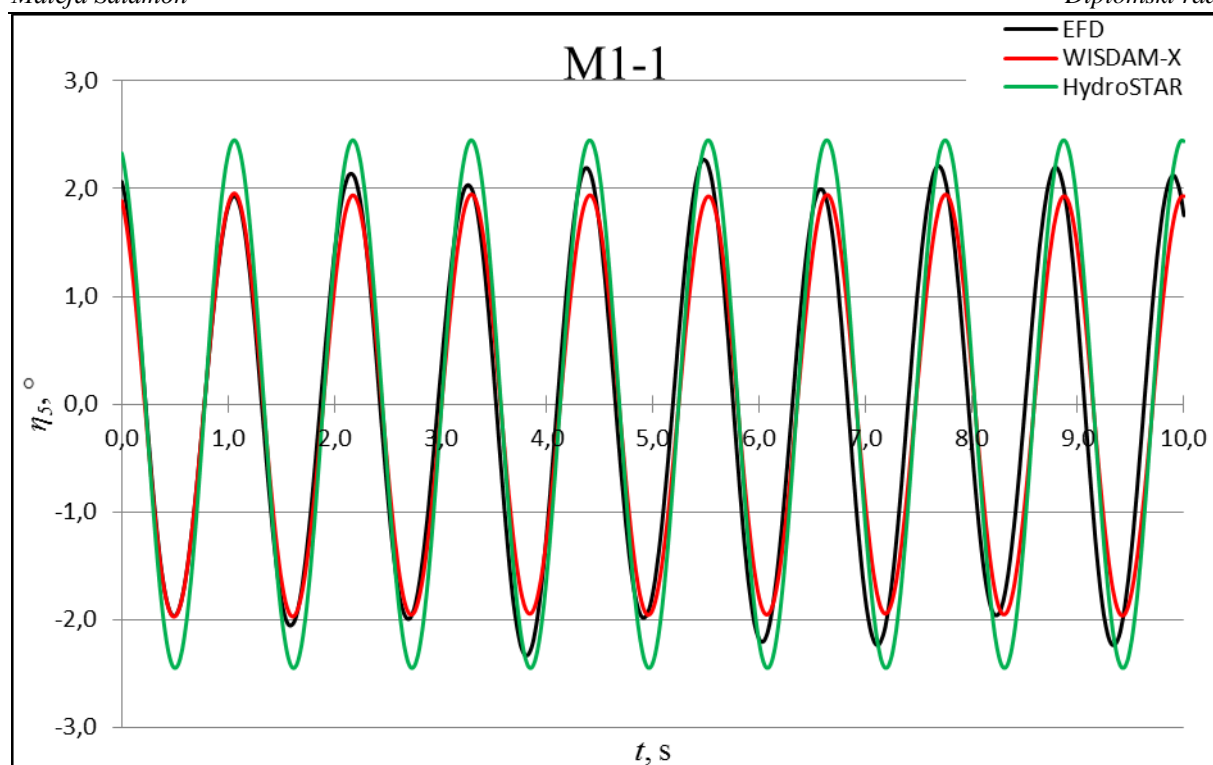
Najveće relativno odstupanje rezultata dobivenih programskim paketom *HydroSTAR* javlja se za slučaj M1-3 za koji je $Fn = 0,33$. Rezultati dobiveni programskim paketom *WISDAM-X* daju najmanja odstupanja za slučaj M1-3 gdje je brzina najveća čime se može zaključiti da će viskozna teorija točnije rezultate poniranja davati na većim brzinama.

5.2.2. Usporedba rezultata posrtanja

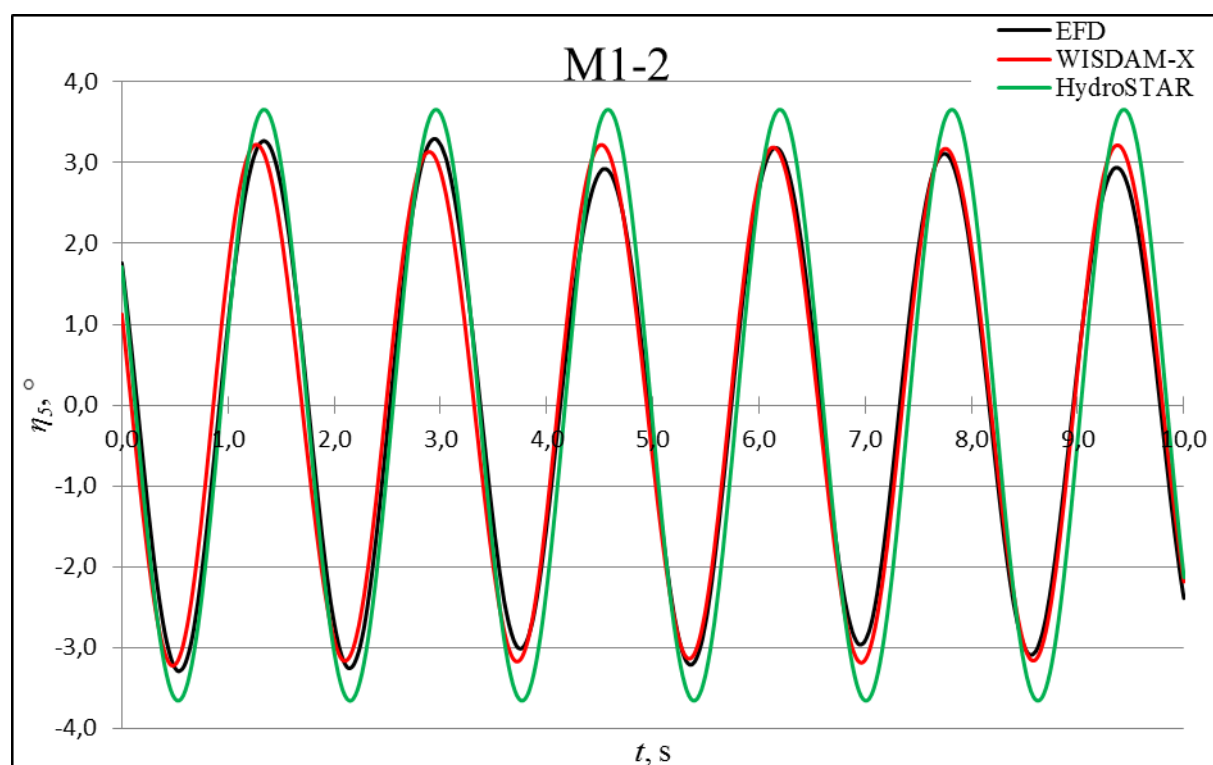
Na slikama 42. - 44. uspoređeni su odzivi posrtanja broda na valovima dobiveni pomoću dva programska paketa s dostupnim eksperimentalnim podacima na Froudeovom broju $Fn = 0,26$ za slučajeve M1-1 i M1-2 te na Froudeovom broju $Fn = 0,33$ za slučaj M1-3. Vrijednosti rezultata posrtanja dobivenih pomoću dva programska paketa dani su u tablicama 6. i 9. dok su rezultati dostupnih eksperimentalnih podataka dani u tablici 14.

Tablica 14. Dostupni eksperimentalni podaci za vrijednosti amplituda posrtanja u vremenskoj domeni za pojedine slučajeve

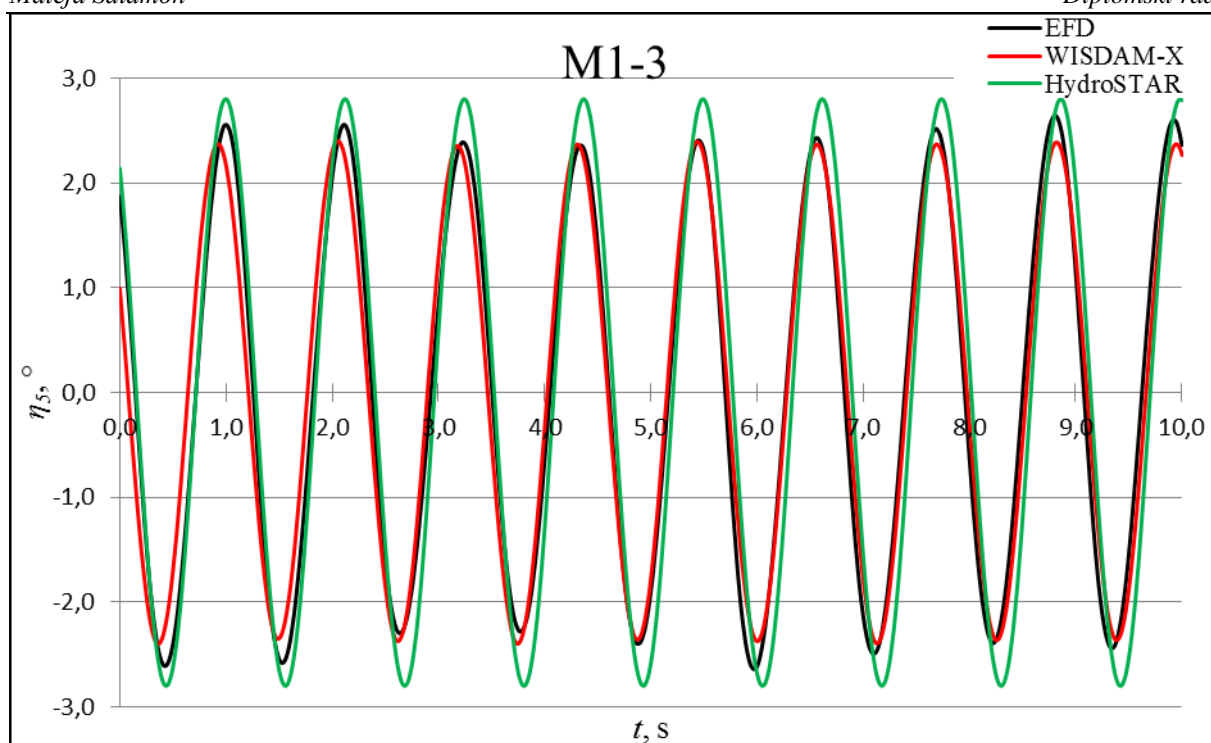
Vrijeme, t [s]	Posrtanje, η_{SE} [°]		
	M1-1	M1-2	M1-3
0,0	2,06477	1,75937	1,86875
0,3	-0,98803	-2,00254	-2,10372
0,6	-1,62269	-3,19094	-1,52720
0,9	1,29815	-0,11676	2,22351
1,2	1,26666	2,85726	0,87603
1,5	-1,86603	2,63233	-2,56883
1,8	-0,78053	-0,57035	-0,28888
2,1	2,06224	-3,22596	2,55817
2,4	0,37881	-1,57970	-0,37355
2,7	-1,99072	2,15186	-2,11557
3,0	0,25722	3,22598	0,82105
3,3	1,95366	0,78644	2,15800
3,6	-0,94561	-2,42545	-1,22557
3,9	-1,99500	-2,35755	-1,61843
4,2	1,18206	0,81113	1,68547
4,5	1,53840	2,89984	1,25928
4,8	-1,57501	1,71960	-2,15901
5,1	-0,86307	-1,78690	-0,72224
5,4	2,04191	-3,16345	2,30430
5,7	0,58060	-0,35681	-0,17844
6,0	-2,17960	2,68128	-2,61449
6,3	-0,03384	2,69114	0,52563
6,6	1,98778	-0,25710	2,36908
6,9	-0,92037	-2,91060	-1,24887
7,2	-2,00800	-1,48067	-2,12506
7,5	1,23451	2,04133	1,46929
7,8	1,80625	3,05114	1,98242
8,1	-1,49156	0,64761	-1,91603
8,4	-1,13858	-2,47663	-1,28915
8,7	1,96731	-2,55984	2,31274
9,0	0,80972	0,49306	1,14949
9,3	-2,21784	2,87282	-2,40480
9,6	-0,30745	1,88268	-0,32194
9,9	2,11834	-1,55852	2,59394
10,0	1,75146	-2,38986	2,36103



Slika 42. Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-1 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X* s eksperimentalnim podacima



Slika 43. Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-2 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X* s eksperimentalnim podacima



Slika 44. Usporedba amplituda posrtanja za slučaj M1-3 u vremenskoj domeni izračunatih programskim paketima *HydroSTAR* i *WISDAM-X* s eksperimentalnim podacima

Tablica 15. Osrednjene vrijednosti amplituda posrtanja izračunate pomoću dva programska paketa i njihovo odstupanje od eksperimentalnih podataka

	η_{5W} [°]	η_{5H} [°]	η_{5E} [°]	Relativno odstupanje <i>WISDAM-X</i> , ξ_{5W} [%]	Relativno odstupanje <i>HydroSTAR</i> , ξ_{5H} [%]
M1-1	1,965055	2,45051	2,299266	14,5	-6,6
M1-2	3,226005	3,658892	3,294647	2,1	-11,1
M1-3	2,40032	2,800609	2,642583	9,2	-6,0

Iz tablice 15. se može vidjeti da se rezultati dobiveni programskim paketom *HydroSTAR* najbolje poklapaju s eksperimentalnim podacima za slučaj M1-3 te se u tom slučaju poklapaju bolje nego rezultati dobiveni programskim paketom *WISDAM-X*. Relativna odstupanja rezultata manja su nego za poniranje čime se može pretpostaviti da viskoznost ima manji utjecaj na odziv posrtanja u odnosu na poniranje. Također se vidi da za razliku od poniranja potencijalna teorija daje veću točnost rezultata u odnosu na viskoznu za relativne valne duljine manje od $\lambda/L_{pp} = 2$ te za veće brzine plovidbe. Može se pretpostaviti da će u slučaju odziva posrtanja veću točnost davati potencijalna teorija za manje valne duljine.

6. REZULTATI ODZIVA U FREKVENCIJSKOJ DOMENI

6.1. Uvod

Morski valovi su slučajan vremenski proces. Kako bi se odredile značajke valova koji se mogu pojaviti na nekom području, valne visine i periodi se bilježe valografima u određenom vremenskom razdoblju. Funkcija gustoće vjerojatnosti pojavljivanja valova određenih valnih visina nije ovisna o području, periodu i ergodičnosti (mogućnost da se analizom pojedinačnog vremenskog zapisa predstavi čitav valni proces) stoga valni proces mora zadovoljiti uvjete homogenosti i stacionarnosti za neki kraći period. Valni proces mora zadovoljiti navedene uvjete kako bi ga bilo moguće opisati matematičkim statističkim veličinama.

Spektar valova prikazuje relativnu važnost i vjerojatnost pojavljivanja komponenti regularnih valova koji superpozicijom tvore nepravilne valove te omogućuje njihov matematički opis. Valovi nastali uslijed refleksije od obale, valovi mrtvog mora nastali na nekom drugom mjestu te općenito valovi iz više smjerova uzrokuju valnu nepravilnost.

Odziv broda na nepravilnim valovima određuje se kroz najčešće definirani spektar gustoće energije valnih amplituda na odgovarajućem području plovidbe. Poznavanje funkcije gustoće spektra valova osnova je za projektiranje opterećenja brodskih i pomorskih konstrukcija. Spektar energije valova $S_{\zeta}(\omega)$ odnosno energija valne amplitude na određenoj frekvenciji vala ovisi o kvadratu amplitude vala i prikazuje se na sljedeći način:

$$S_{\zeta}(\omega)d\omega = \frac{1}{2}\zeta_a^2(\omega) \quad (87)$$

Spektar valova moguće je odrediti na osnovu mjerenja, no često se koristi jedan od idealiziranih teorijskih spektara valova. Standardni spektri valova opisani su malim brojem parametara ili karakterističnih veličina slučajnog stanja mora. Karakteristične veličine spektra valova su nulti valni period te značajna valna visina (srednja vrijednost trećine najviših valnih visina). Linearna hidrodinamička analiza omogućuje primjenu superpozicije odziva na regularnim valovima te prijenosnih funkcija u proračunima odziva broda na nekom stanju mora. Svaka pravilna komponenta nepravilnog vala ima svoju frekvenciju, amplitudu te fazni kut. Spektar energije valova može biti susretni spektar energije valova ili spektar energije valova. Susretni spektar ovisi o susretnim frekvencijama odnosno onima kojima je brod izložen te ima nešto drugačiji oblik dok spektar energije valova obuhvaća raspon frekvencija

valova [1]. Površine ispod krivulja jednog i drugog spektra moraju biti jednake obzirom da se količina energije valova ne mijenja.

Ukoliko su poznati valni spektar i prijenosne funkcije broda, relativno jednostavno može se odrediti i spektar odziva broda prema slijedećoj jednadžbi:

$$S_{\eta_{\zeta}}(\omega) = \left| \frac{\eta_a}{\zeta_a}(\omega) \right|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega) \quad (88)$$

Kako bi se procijenio odziv broda na nepravilnim valovima potrebno je proračunati odziv broda na pravilnim valovima u određenom frekvencijskom rasponu. Svaka komponenta pravilnog vala prenosi se u komponentu odziva množenjem s odgovarajućom amplitudom odziva odnosno prijenosnom funkcijom. Često se u praksi odziv broda na nepravilnim valovima proračunava samo za određena njihanja broda koja se smatraju najvažnijima ili najučestalijima prilikom plovidbe broda [4]. Ako je energija valova koncentrirana u području frekvencija bliskim prirodnim frekvencijama može doći do rezonancije pa se brod nastoji projektirati tako da se frekvencije na kojima prijenosna funkcija ima maksimum i frekvencije na kojima spektar odziva ima maksimum što više razlikuju. U slučaju broda KCS izračunati su samo odzivi poniranja i posrtanja pri kojima postoji opasnost ulaska u rezonanciju za razliku od ostalih odziva.

6.2. Odziv modela

U dijagramima poniranja i posrtanja u ovisnosti o frekvenciji prikazat će se njihanja u bezdimenzijskom obliku. Rezultati proračuna dobiveni programskim paketom *HydroSTAR* su prijenosne funkcije. Dimenzija prijenosne funkcije poniranja H_{η_5} iznosi m/m odnosno nema dimenziju dok je dimenzija prijenosne funkcije posrtanja H_{η_3} °/m te je prijenosnu funkciju posrtanja potrebno preračunati u radijane te podijeliti s valnim brojem k kako slijedi:

$$\frac{\eta_5}{k\zeta} = H_{\eta_5} \frac{\pi}{180k} \quad (89)$$

gdje je:

$\frac{\eta_5}{k\zeta}$ - bezdimenzijska amplituda posrtanja,

H_{η_5} - prijenosna funkcija posrtanja.

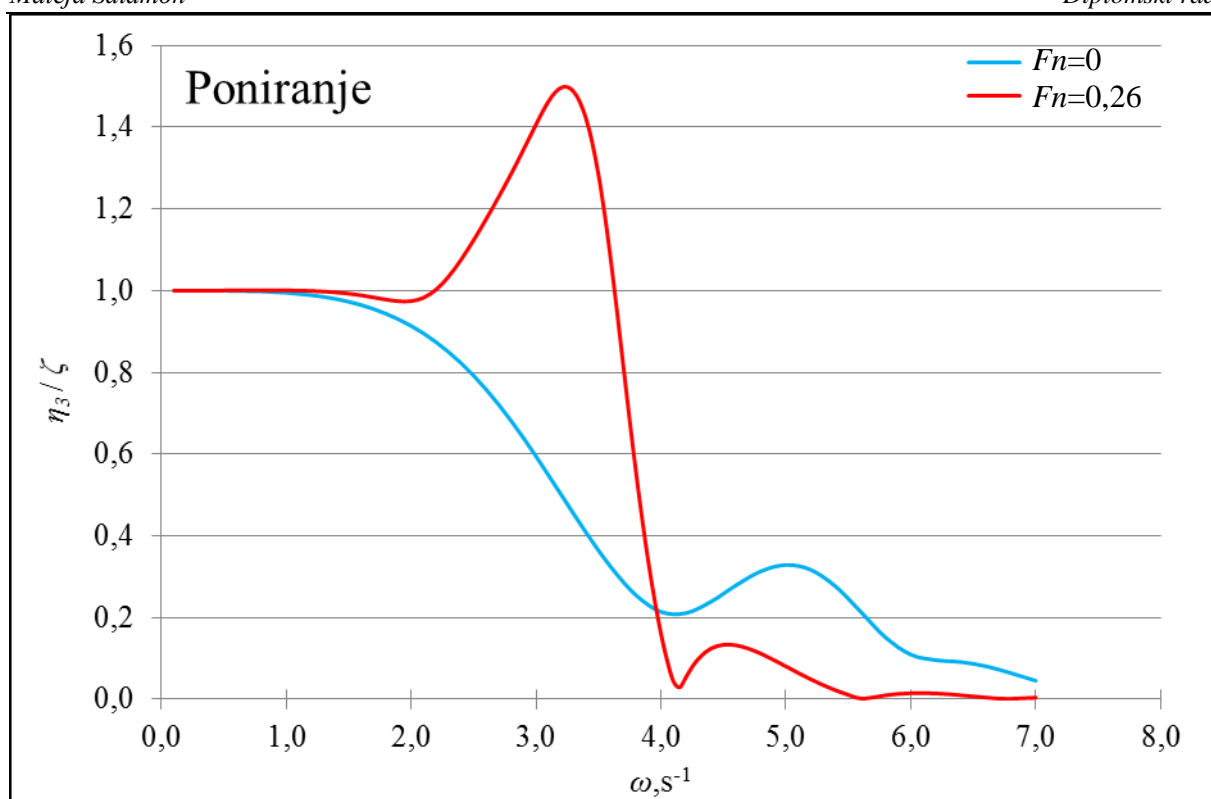
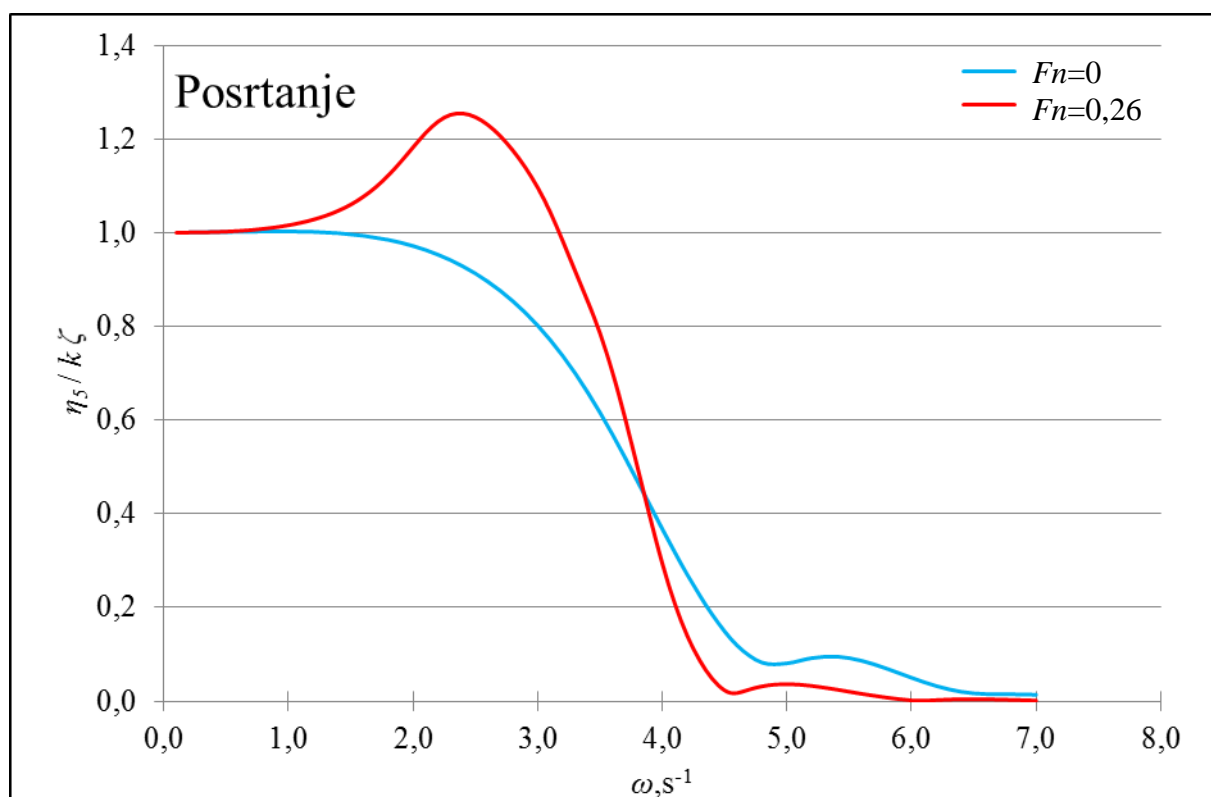
Valni broj može se izračunati pomoću valne frekvencije na temelju izraza (8).

6.2.1. Model 1

U tablici 16. dane su bezdimenzijske vrijednosti amplituda odziva modela 1 za raspon frekvencija $\omega = 0,2 \div 7 \text{ s}^{-1}$ za Froudeove brojeve 0 i 0,26 te su dani valni brojevi za pojedinu frekvenciju. Na slikama 45. i 46. prikazani su odzivi modela 1 za dane frekvencije i Froudeove brojeve.

Tablica 16. Vrijednosti amplituda odziva u frekvencijskoj domeni za model 1

$\omega, [\text{s}^{-1}]$	$k, [\text{m}^{-1}]$	$Fn=0$		$Fn=0,26$	
		η_{3H}/ζ	$\eta_{5H}/k\zeta$	η_{3H}/ζ	$\eta_{5H}/k\zeta$
0,2	0,0041	1,0000	1,0008	1,0000	1,0005
0,4	0,0163	0,9999	1,0014	1,0002	1,0015
0,6	0,0367	0,9994	1,0022	1,0005	1,0039
0,8	0,0652	0,9980	1,0029	1,0008	1,0085
1,0	0,1019	0,9948	1,0030	1,0006	1,0162
1,2	0,1468	0,9891	1,0020	0,9993	1,0282
1,4	0,1998	0,9796	0,9992	0,9957	1,0472
1,6	0,2610	0,9649	0,9938	0,9885	1,0770
1,8	0,3303	0,9436	0,9850	0,9782	1,1225
2,0	0,4077	0,9139	0,9718	0,9745	1,1828
2,2	0,4934	0,8741	0,9532	1,0028	1,2375
2,4	0,5872	0,8226	0,9282	1,0760	1,2547
2,6	0,6891	0,7584	0,8957	1,1751	1,2303
2,8	0,7992	0,6817	0,8541	1,2859	1,1759
3,0	0,9174	0,5945	0,8019	1,4069	1,0964
3,2	1,0438	0,5013	0,7374	1,4967	0,9829
3,4	1,1784	0,4084	0,6597	1,4208	0,8544
3,6	1,3211	0,3233	0,5694	1,0698	0,7021
3,8	1,4720	0,2548	0,4699	0,5552	0,5001
4,0	1,6310	0,2143	0,3676	0,1607	0,2941
4,2	1,7982	0,2111	0,2704	0,0544	0,1397
4,4	1,9735	0,2390	0,1852	0,1243	0,0482
4,6	2,1570	0,2791	0,1190	0,1324	0,0175
4,8	2,3486	0,3135	0,0825	0,1117	0,0317
5,0	2,5484	0,3289	0,0810	0,0807	0,0363
5,2	2,7564	0,3169	0,0920	0,0490	0,0326
5,4	2,9725	0,2757	0,0952	0,0220	0,0248
5,6	3,1967	0,2139	0,0865	0,0021	0,0158
5,8	3,4292	0,1509	0,0696	0,0102	0,0078
6,0	3,6697	0,1096	0,0501	0,0152	0,0017
6,2	3,9185	0,0961	0,0324	0,0145	0,0025
6,4	4,1753	0,0915	0,0200	0,0102	0,0041
6,6	4,4404	0,0811	0,0153	0,0046	0,0040
6,8	4,7136	0,0642	0,0148	0,0013	0,0028
7,0	4,9949	0,0456	0,0138	0,0042	0,0012

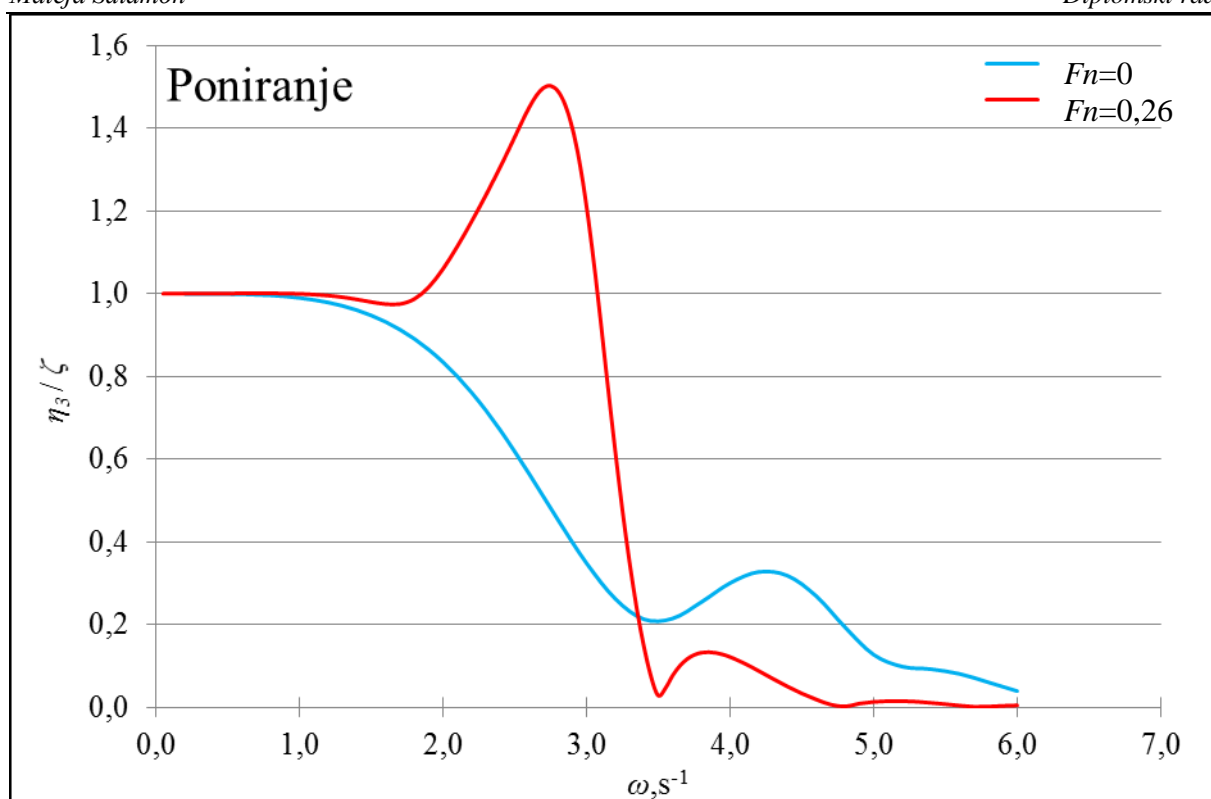
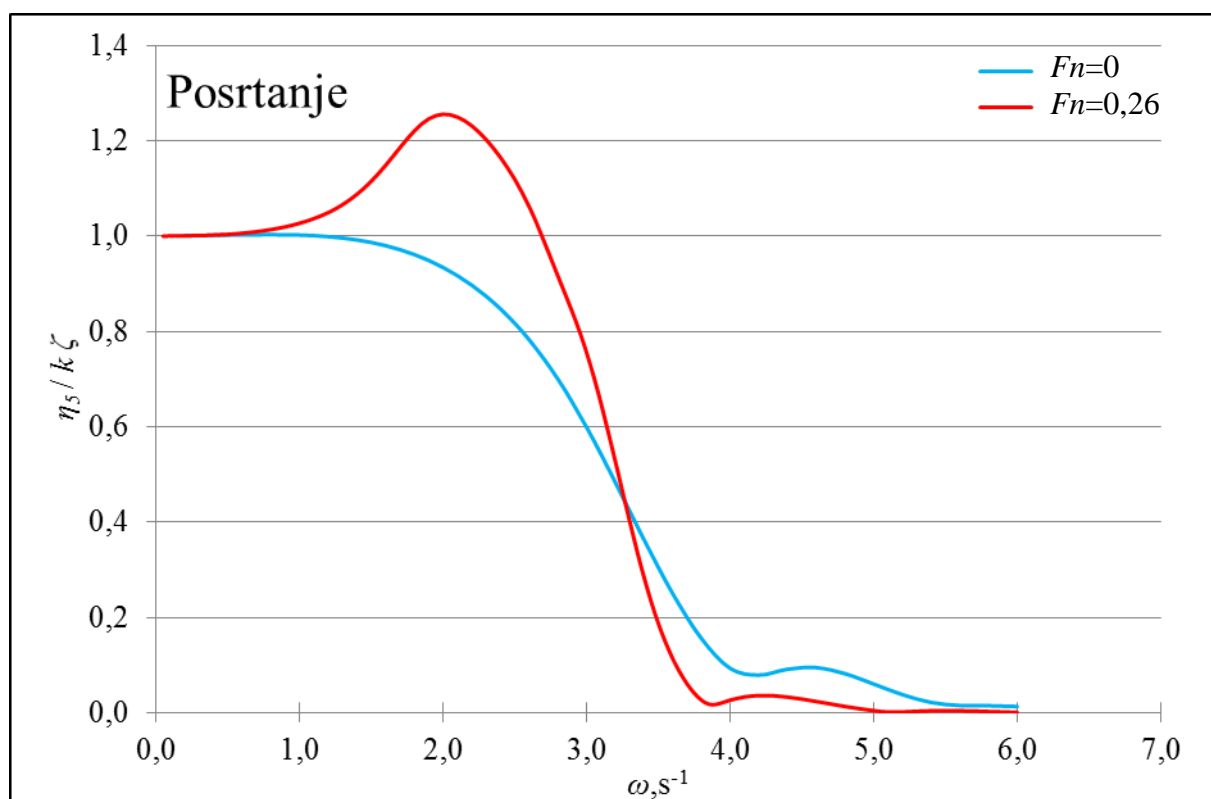
Slika 45. Usporedba odziva poniranja modela 1 pri $F_n=0$ i $F_n=0,26$ Slika 46. Usporedba odziva posrtanja modela 1 pri $F_n=0$ i $F_n=0,26$

6.2.2. Model 2

U tablici 17. dane su bezdimenzijske vrijednosti amplituda odziva modela 2 za raspon frekvencija $\omega = 0,2 \div 6 \text{ s}^{-1}$ za Froudeove brojeve 0 i 0,26 te su dani valni brojevi za pojedinu frekvenciju. Na slikama 47. i 48. prikazani su odzivi modela 1 za dane frekvencije i Froudeove brojeve.

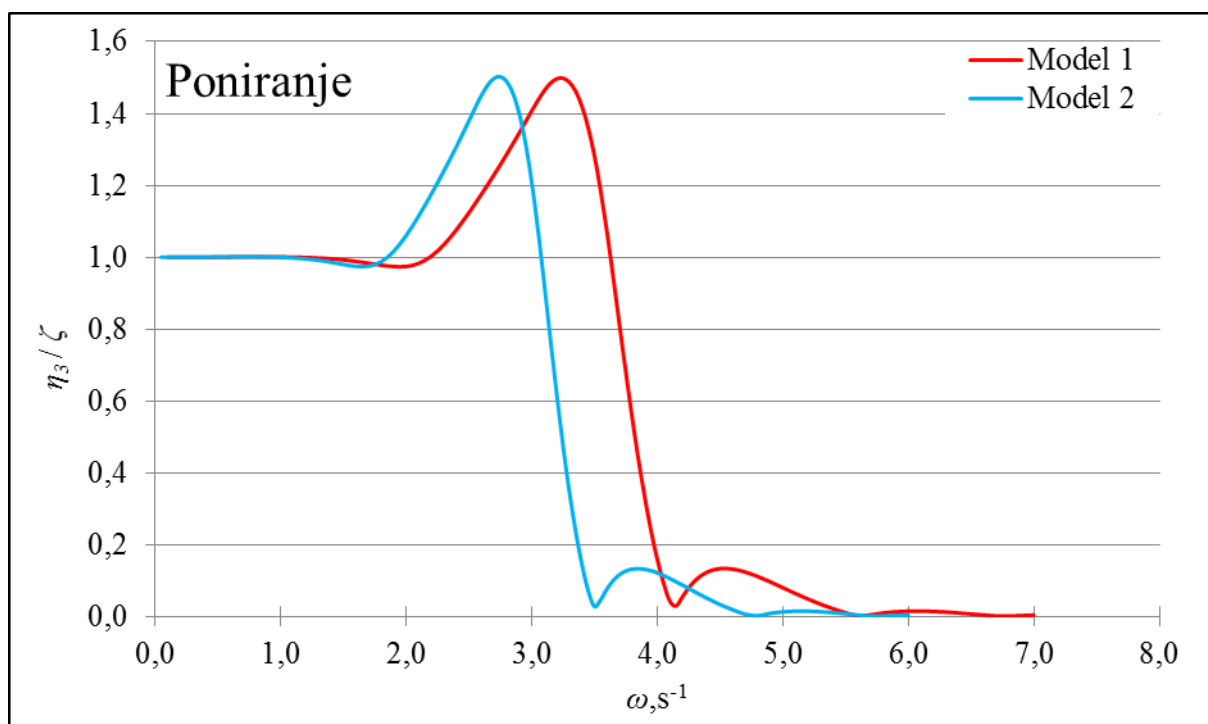
Tablica 17. Vrijednosti amplituda odziva u frekvencijskoj domeni za model 2

$\omega, [\text{s}^{-1}]$	$k, [\text{m}^{-1}]$	$Fn=0$		$Fn=0,26$	
		η_{3H}/ζ	$\eta_{5H}/k\zeta$	η_{3H}/ζ	$\eta_{5H}/k\zeta$
0,2	0,0041	1,0000	1,0009	1,0000	1,0006
0,4	0,0163	0,9998	1,0017	1,0003	1,0022
0,6	0,0367	0,9988	1,0026	1,0007	1,0061
0,8	0,0652	0,9960	1,0031	1,0008	1,0137
1,0	0,1019	0,9899	1,0022	0,9996	1,0269
1,2	0,1468	0,9787	0,9990	0,9954	1,0494
1,4	0,1998	0,9602	0,9920	0,9862	1,0876
1,6	0,2610	0,9319	0,9800	0,9748	1,1486
1,8	0,3303	0,8909	0,9613	0,9872	1,2208
2,0	0,4077	0,8345	0,9343	1,0600	1,2557
2,2	0,4934	0,7607	0,8971	1,1751	1,2314
2,4	0,5872	0,6695	0,8474	1,3073	1,1650
2,6	0,6891	0,5645	0,7826	1,4501	1,0619
2,8	0,7992	0,4538	0,7001	1,4897	0,9164
3,0	0,9174	0,3487	0,5992	1,2105	0,7559
3,2	1,0438	0,2625	0,4838	0,6186	0,5280
3,4	1,1784	0,2130	0,3632	0,1463	0,2847
3,6	1,3211	0,2149	0,2501	0,0771	0,1137
3,8	1,4720	0,2546	0,1558	0,1323	0,0265
4,0	1,6310	0,3006	0,0933	0,1219	0,0263
4,2	1,7982	0,3274	0,0789	0,0880	0,0361
4,4	1,9735	0,3184	0,0913	0,0506	0,0329
4,6	2,1570	0,2691	0,0947	0,0191	0,0237
4,8	2,3486	0,1941	0,0820	0,0026	0,0132
5,0	2,5484	0,1274	0,0604	0,0134	0,0045
5,2	2,7564	0,0985	0,0381	0,0152	0,0015
5,4	2,9725	0,0924	0,0216	0,0111	0,0040
5,6	3,1967	0,0810	0,0153	0,0045	0,0040
5,8	3,4292	0,0606	0,0147	0,0019	0,0025
6,0	3,6697	0,0395	0,0130	0,0048	0,0007

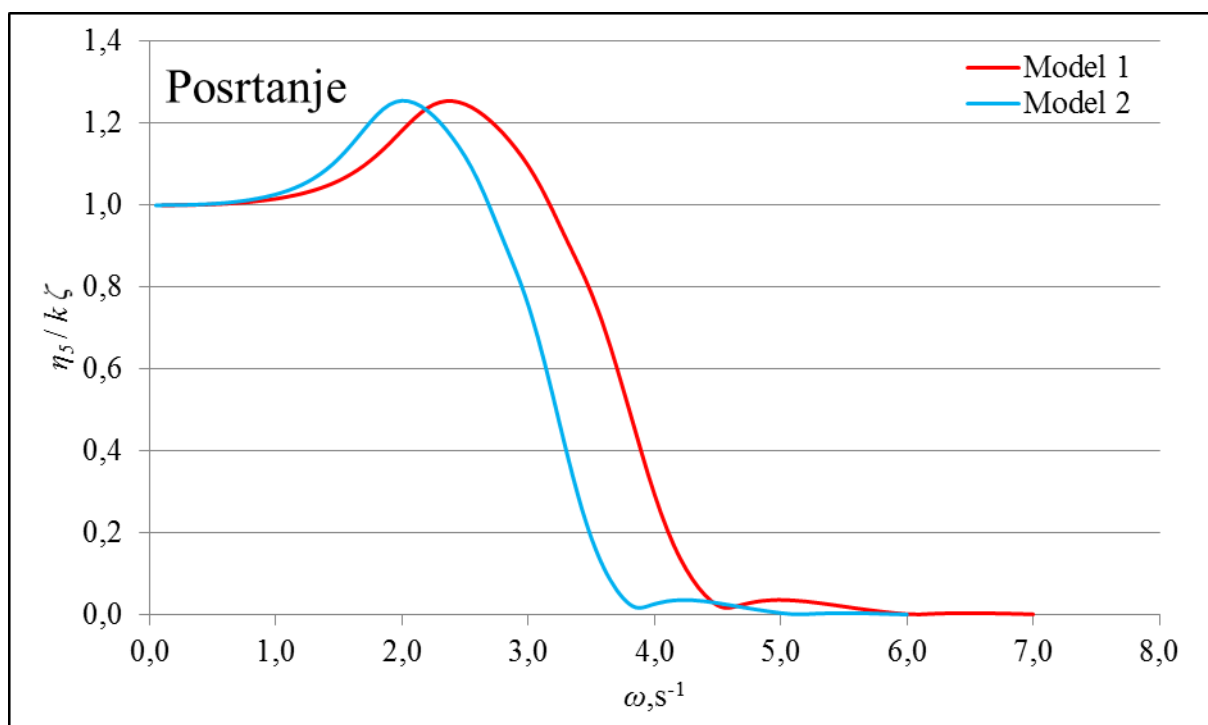
Slika 47. Usporedba odziva poniranja modela 2 pri $F_n=0$ i $F_n=0,26$ Slika 48. Usporedba odziva posrtanja modela 2 pri $F_n=0$ i $F_n=0,26$

6.2.3. Usporedba odziva modela

Na slikama 49. i 50. prikazana je usporedba odziva poniranja odnosno posrtanja oba modela na $Fn = 0,26$.



Slika 49. Usporedba odziva poniranja modela 1 i modela 2 pri $Fn=0,26$



Slika 50. Usporedba odziva posrtanja modela 1 i modela 2 pri $Fn=0,26$

Krivulje poniranja odnosno posrtanja na dijagramima prate isti trend za oba modela. Na dijagramima se vidi da model 1 doseže maksimalne amplitude odziva pri većim valnim frekvencijama nego model 2 što je i za očekivati obzirom da model 1 ima manje dimenzije, a time i manju duljinu. Na većim valnim frekvencijama valna duljina je manja pa se prema tome može pretpostaviti da će povećanjem duljine broda odzivi poprimiti maksimum na manjim frekvencijama odnosno većim valnim duljinama.

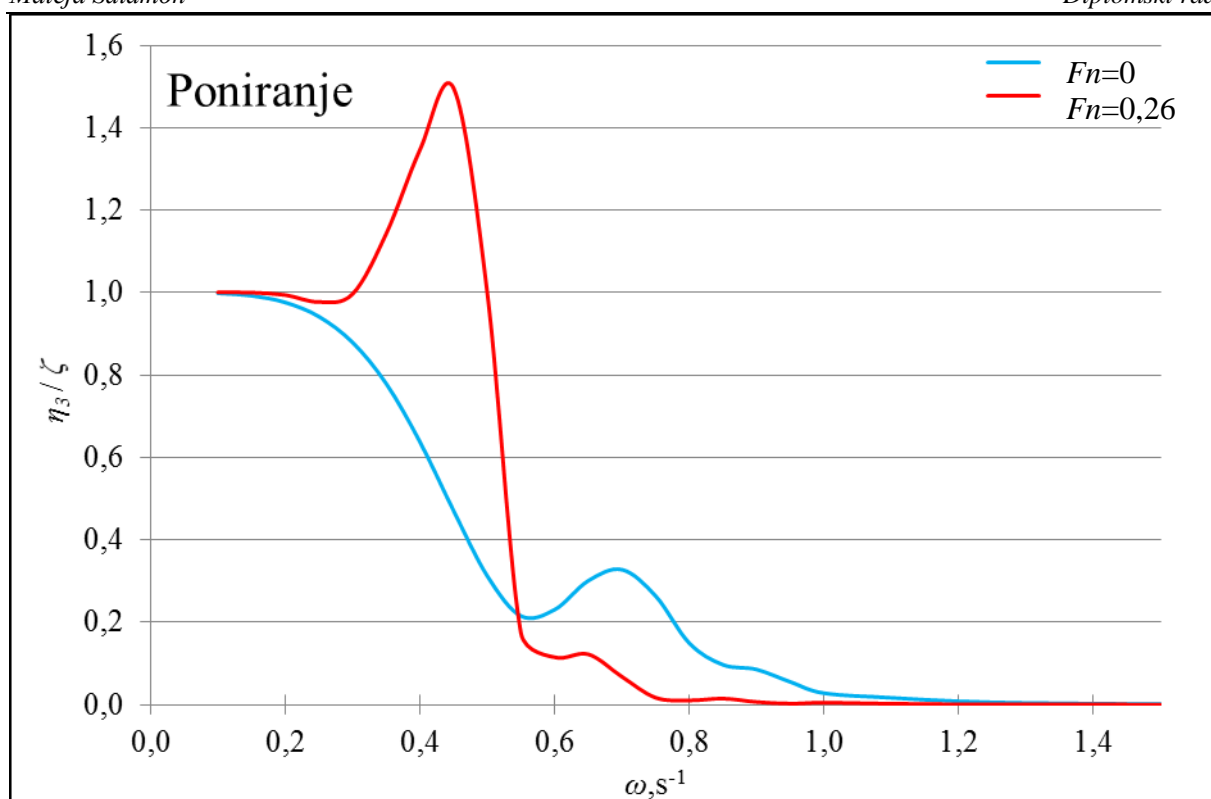
Bezdimenzijske amplitude odziva približavaju se jedinici na malim valnim frekvencijama što odgovara velikim valnim duljinama. Na velikim valnim duljinama brod prati oblik vala što znači da će se odziv poniranja približiti vrijednosti valne amplitude $\eta_3 = \zeta$ dok će se amplituda posrtanja približiti vrijednosti valnog nagiba $\eta_5 = k\zeta$.

6.3. Odziv broda u naravi

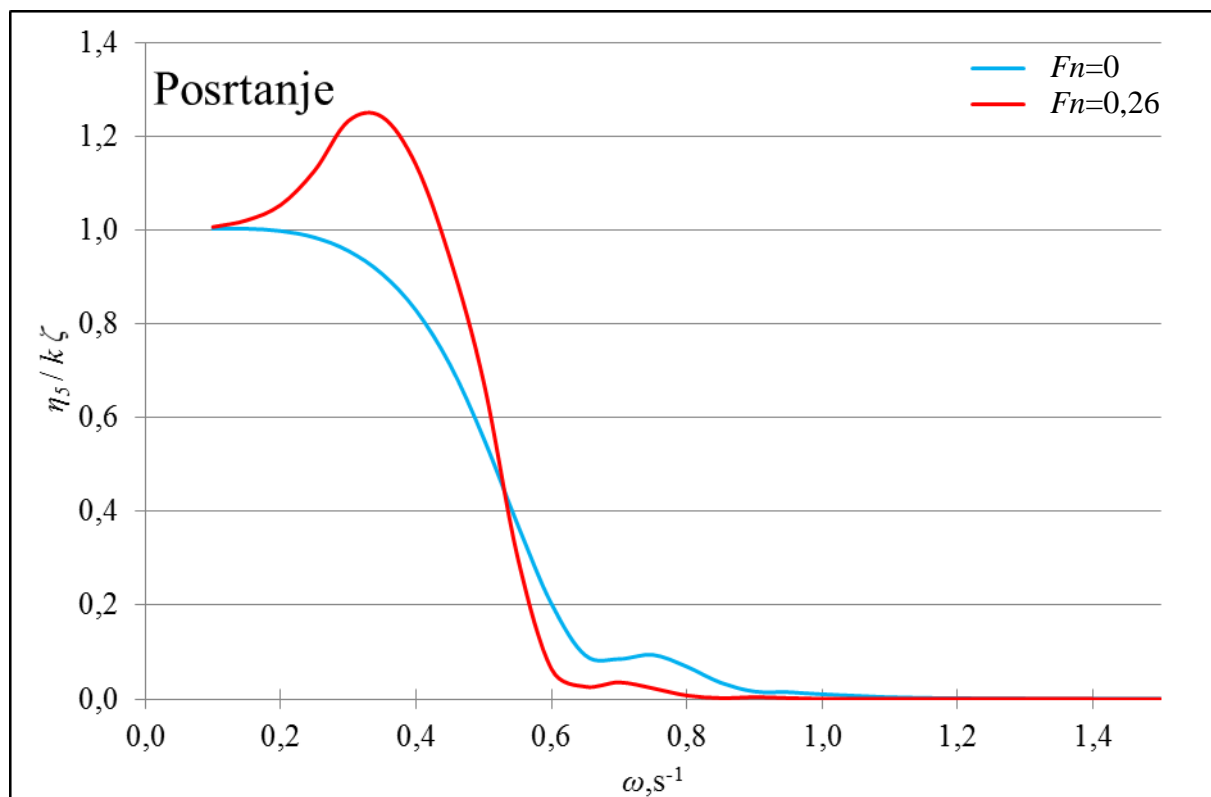
U tablici 18. dane su vrijednosti amplitude odziva broda u frekvencijskoj domeni za $Fn = 0$ i $Fn = 0,26$. Dan je manji raspon frekvencija nego za modele, jer za brod u naravi amplitude njihovanja postižu maksimum na puno manjim frekvencijama nego što je to slučaj kod modela. Brod se projektira tako da se maksimalni odziv postigne pri valnim duljinama većim od duljine broda odnosno pri malim valnim frekvencijama što se može vidjeti na slikama 52. i 53. U dijagramima na slikama 51. i 52. također se vidi da amplitude odziva broda u mirovanju nikada ne prelaze vrijednost amplitude vala te se vidi da pri bilo kojoj brzini broda, na valovima manje duljine od duljine broda, amplitude odziva padaju i teže k nuli.

Tablica 18. Vrijednosti amplituda odziva u frekvencijskoj domeni za brod u naravi za $Fn=0$ i $Fn=0,26$

$\omega, [s^{-1}]$	$k, [m^{-1}]$	$Fn=0$		$Fn=0,26$	
		η_{3H}/ζ	$\eta_{5H}/k\zeta$	η_{3H}/ζ	$\eta_{5H}/k\zeta$
0,10	0,0010	0,9986	1,0026	1,0007	1,0065
0,15	0,0023	0,9927	1,0027	1,0002	1,0208
0,20	0,0041	0,9763	0,9981	0,9943	1,0536
0,25	0,0064	0,9417	0,9842	0,9775	1,1263
0,30	0,0092	0,8792	0,9556	0,9971	1,2327
0,35	0,0125	0,7790	0,9063	1,1437	1,2412
0,40	0,0163	0,6379	0,8287	1,3468	1,1384
0,45	0,0206	0,4704	0,7134	1,4960	0,9404
0,50	0,0255	0,3122	0,5556	0,9985	0,6756
0,55	0,0308	0,2152	0,3720	0,1735	0,3023
0,60	0,0367	0,2308	0,2033	0,1152	0,0643
0,65	0,0431	0,3009	0,0932	0,1224	0,0264
0,70	0,0499	0,3277	0,0854	0,0678	0,0356
0,75	0,0573	0,2637	0,0943	0,0171	0,0229
0,80	0,0652	0,1493	0,0691	0,0105	0,0076
0,85	0,0736	0,0970	0,0349	0,0150	0,0020
0,90	0,0826	0,0856	0,0161	0,0067	0,0042
0,95	0,0920	0,0553	0,0145	0,0027	0,0021
1,00	0,1019	0,0282	0,0103	0,0049	0,0006
1,10	0,1233	0,0168	0,0039	0,0025	0,0005
1,20	0,1468	0,0083	0,0018	0,0009	0,0004
1,30	0,1723	0,0042	0,0009	0,0006	0,0003
1,40	0,1998	0,0024	0,0005	0,0007	0,0002
1,50	0,2294	0,0014	0,0002	0,0004	0,0000



Slika 51. Usporedba odziva poniranja broda u naravi pri $F_n=0$ i $F_n=0,26$



Slika 52. Usporedba odziva posrtanja broda u naravi pri $F_n=0$ i $F_n=0,26$

7. ZAKLJUČAK

Ponašanje broda na valovima važno je procijeniti već u predprojektu broda. Njihanje broda utječe na posadu, putnike, opremu, teret te strukturne elemente stoga je važno dobro opisati model njihanja broda kako bi se što točnije procijenila operativnost i sigurnost broda na nemirnom moru. Eksperimentalna ispitivanja pomorstvenih svojstava vrlo su skupa i dugotrajna te se u današnje vrijeme pomorstvena svojstva sve češće određuju raznim programskim paketima. Model njihanja broda na valovima opisan je potencijalnom i viskoznom teorijom strujanja kako bi se odredili osnovni izrazi za proračun pomorstvenih svojstava. U ovom radu koristili su se programski paketi *WISDAM-X* temeljen na viskoznoj metodi i *HydroSTAR* temeljen na potencijalnoj metodi.

U oba programska paketa određivan je odziv poniranja i posrtanja modela 1 i modela 2 u vremenskoj domeni te su rezultati prikazani tablicama i dijagramima. Ulazni podaci za brod i stanje mora preuzeti su iz postojećih podataka modelskih ispitivanja provedenih u Korejskom brogarskom institutu (KRISO).

Nakon određivanja odziva dana je usporedba rezultata u vremenskoj domeni dobivenih pomoću oba programska paketa te je prikazana dijagramima. Usporedbom amplituda poniranja i posrtanja može se zaključiti da će relativno odstupanje između rezultata viskozne i potencijalne metode biti najmanja na većim valnim duljinama te će za relativnu valnu duljinu $\lambda/L_{pp} = 2$ iznositi 4,4% za poniranje, a 11,8% za posrtanje. Najveća razlika pojavila se na manjim valnim duljinama odnosno $\lambda/L_{pp} = 1,15$ za model 1 i $\lambda/L_{pp} = 1,1497$ za model 2. U tom slučaju relativno odstupanje rezultata poniranja iznosi 32,2 % za model 1 i 32,1% za model 2, a relativno odstupanje rezultata posrtanja iznosi 19,8% za model 1 i 28,0% za model 2. Također se vidi da povećanje brzine utječe na smanjenje relativnog odstupanja rezultata i to više kod odziva posrtanja.

Rezultati odziva modela 1 uspoređeni su i s dostupnim eksperimentalnim podacima. Usporedba je prikazana u dijagramima i tablicama na osnovu prosječnih vrijednosti amplituda odziva dobivenih pojedinom metodom. Rezultati posrtanja obje metode općenito se bolje poklapaju s eksperimentalnim podacima nego rezultati poniranja. Razlika je prikazana u postotcima te se može primijetiti da potencijalna metoda daje najtočnije rezultate poniranja za relativne valne duljine $\lambda/L_{pp} = 2$ gdje odstupanje iznosi 19,5% dok viskozna metoda za isti

slučaj daje najveća odstupanja odziva poniranja iznosa 24,9%. Viskoznom metodom odziv poniranja najbolje se poklapa s eksperimentalnim podacima za slučaj kada je $Fn = 0,33$ te relativno odstupanje viskozne metode iznosi 12,5%. U tom slučaju potencijalna metoda daje najveća relativna odstupanja poniranja u iznosu od 27,1%. Rezultati odziva posrtanja potencijalne teorije najmanje odstupaju pri $Fn = 0,33$ te relativno odstupanje iznosi 6,0%, a rezultati viskozne metode u tom slučaju odstupaju 9,2%. Viskozna metoda najpouzdanije rezultate posrtanja daje za slučaj $\lambda/L_{pp} = 2$ gdje relativno odstupanje iznosi 2,1%, a potencijalna metoda za isti slučaj daje relativno odstupanja od 11,1%.

Povećanjem brzine broda rezultati posrtanja dobiveni potencijalnom teorijom postaju točniji u odnosu na rezultate dobivene viskoznom teorijom dok su za isti slučaj rezultati poniranja dobiveni viskoznom teorijom točniji.

Ni jedna metoda nije dala rezultate identične eksperimentalnim te je njihova točnost ovisna o brzini broda i duljini valova. Obzirom da su odstupanja rezultata posrtanja manja nego odstupanja rezultata poniranja može se zaključiti da je posrtanje bolje opisano numeričkim modelom te manje ovisi o viskoznosti.

Na kraju je dan prikaz odziva poniranja i posrtanja modela i broda u naravi dobivenih programskim paketom *HydroSTAR* u frekvencijskoj domeni. Vidljivo je da će brod u naravi najveći odziv imati za puno veće valne duljine u odnosu na model, odnosno za manje valne frekvencije nego model, što je i za očekivati.

LITERATURA

- [1] Prpić-Oršić, J., Čorić, V.: Pomorstvenost plovni objekata, Zigo, Rijeka, 2006.
- [2] Sariöz, K., Narli, E., : Effect of criteria on seakeeping performance assessment, Ocean Engeneering, vol.32, 2005, pp.1161-1173.
- [3] Wikipedia – Seakeeping
(en.wikipedia.org/wiki/Seakeeping)
- [4] Radan, D.: Uvod u hidrodinamiku broda, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2004.
- [5] Wikipedia – Ship stability
(en.wikipedia.org/wiki/Ship_stability)
- [6] Federation of American Scientists – Stability and Buoyancy Lessons
(fas.org/man/dod-101/navy/docs/swos/dca/Image569.gif)
- [7] Safety for sea – Bilge keel
(www.safety4sea.com/images/media/dictionary/bilge-keels2.jpg)
- [8] Power & Motoryacht – Gyroscope
(www.powerandmotoryacht.com/boat/control-moment-gyroscope-main.jpg)
- [9] Journée, J.M.J., Pinkster, J.: Introduction in Ship Hydromechanics, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2002.
- [10] Salvesen, N., Tuck, E.O., Faltinsen, O.M.: Ship Motions and Sea Loads, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1970.
- [11] Bertram, V.: Practical Ship Hydrodynamics, Oxford, 2000.
- [12] St. Denis, M., Pierson W.J.: On the Motions of Ships in Confused Seas, 1953.
- [13] Kim, J., Kim, Y.C., Kim, H.C., Van, S.H.: Comparison of potential and viscous methods for the nonlinear ship wave problem, International Journal of Naval Architechture and Ocean Engeneering, vol.3, 2011., pp. 159-173.
- [14] Neel, R.E.: Advances in Computational Fluid Dynamics: Turbulent Separated Flows and Transonic Potential Flows, A dissertation at Faculty of Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia, 1997.
- [15] HYDROSTAR for Experts, v6.11 - User Manual, 2010. BureauVeritas, Paris.
- [16] Kahya, E.: Fluid mechanics, ITU Faculty of Civil Engineering, Istanbul, Turkey, 2013.
- [17] Newman, J.: Physics of the Life Science, New York, 2008.
- [18] White, F.M.: Viscous Fluid Flow, University of Rhode Island, 1991.

- [19] Werner, A., Degiuli, N.: *Mehanika Fluida II*, interna skripta, FSB, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- [20] Dobek, S.: *Fluid Dynamics and the Navier-Stokes Equation*, University of Maryland, 2012.
- [21] Scienceworld.Wolfram – Navier-Stokes Equation
(www.scienceworld.wolfram.com/physics/Navier-StokesEquations.html)
- [22] Orihara, H., Miyata, H.: Evaluation of added resistance in regular incident waves by computational fluid dynamics motion simulation using an overlapping grid system, *Journal of Marine Science and Technology*, 2003.
- [23] Sato, Y., Orihara, H., Miyata, H.: Practical Application of Two CFD Codes for Ship Motions in Arbitrary Waves, 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, 17-22 September 2006.
- [24] Tokyo 2015, A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics
(www.t2015.nmri.go.jp/kcs.html)